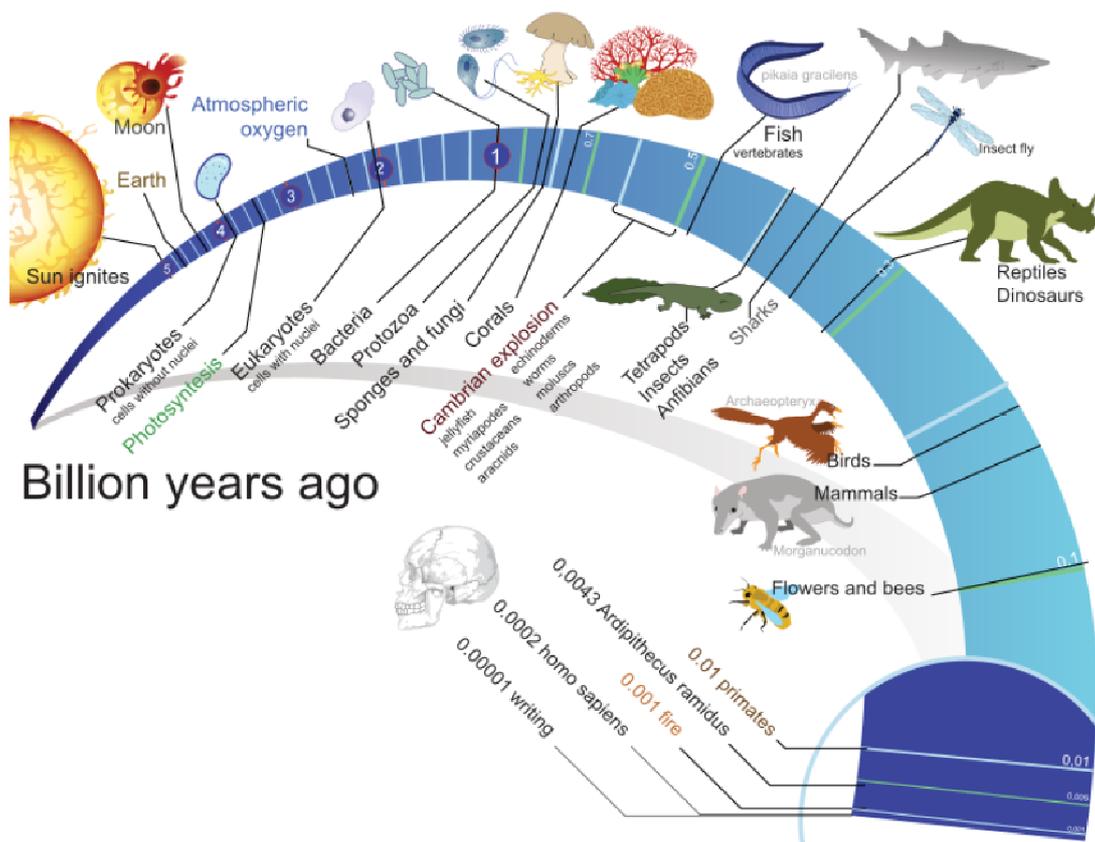


La biografía de la Vida

Una maravillosa aventura



Jaime Reguart Pelegrí

Diciembre 2015

Imagen de portada extraída de Wikimedia

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Timeline_evolution_of_life.svg?uselang=es

Licencia CC BY-NC-ND 2.5 ES

El único coste será el exclusivo de edición. El autor.

INDICE

1. Hadeico 9
2. Algunas generalidades 25
3. La química se apunta a lo bio 39
4. Se inicia la complejidad 49
5. La casa natal de la Vida 61
6. Entramos en el eón Arcaico 77
7. Rudimentos de gestión energética 87
8. El metabolismo constructor 97
9. La vida en el Arcaico 107
10. Abrimos las puertas del Proterozoico 119
11. Aparecen las células eucariotas 129
12. La reproducción sexuada 145
13. La genética 155
14. La reproducción 173
15. La multicelularidad puerta de la complejidad 179
16. El árbol filogenético del Precámbrico 191
17. Fin del Proterozoico. Paréntesis filogenético 205
18. La biota del Cámbrico 211
19. Los filos del Cámbrico 225
20. La evolución por selección natural 243
21. La posibilidad real del cambio 257
22. El camino de la diferenciación celular 263
23. El caso de la célula que decide diferenciarse por “altruismo” 273
24. Dos nuevas habilidades: bilateralidad y segmentación 279
25. Evolución de la notocorda y del sistema nervioso 289
26. Evolución de herramientas de sostén y alimentación 297
27. Evolución del ojo 307
28. El Ordovícico 315
29. El Silúrico 329
30. El Devónico: desarrollo de las plantas 343
31. El Devónico: la edad de los peces 355
32. El Devónico: los tetrápodos conquistan la tierra 365
33. Entramos en el Carbonífero 375
34. El Carbonífero nos incita a hablar de insectos 387
35. Anfibios y reptiles del Carbonífero 397

36. El Pérmico: fin del Paleozoico 409
37. La gran extinción del Pérmico-Triásico 421
38. Periodo Triásico 429
39. Parque Jurásico 451
40. Grandes dinosaurios 467
41. De los dinosaurios voladores a las aves 481
42. El Cretácico y sus plantas 493
43. La biota animal en el Cretácico 507
44. Los mamíferos del Cretácico 523
45. La crisis del Cretácico/Terciario 531
46. Comienza el Terciario 545
47. El Paleoceno 559
48. El Eoceno 573
49. Oligoceno y Mioceno 585
50. Los últimos 5 millones de años 599
51. Iniciación a los más próximos homínidos 609
52. Desde el primer hominino hasta el nuevo Homo 617
53. Los Homo 627
54. El corazón de la evolución humana 639
55. La aventura viajera del Homo 651
56. Reflexiones 661
57. Buscando vida desesperadamente 669
58. Extremófilos 677
59. ¿Tenemos vecinos? 685
60. ¿Hay vida aún más lejos? 695
61. Últimas palabras 705

ANEXO 1: Somera cronología de la Vida y la evolución 709

ANEXO 2: Bibliografía y fuentes de información 713

ANEXO 3: Notas 717

La biografía de la Vida: Una maravillosa aventura

“Toda descripción, por objetiva e ingenua que parezca, constituye interpretación personal, punto de vista propio del autor. Sabido es que el hombre mezcla a todo su personalidad y, cuando cree fotografiar el mundo exterior, a menudo se contempla y se retrata a sí mismo” (Santiago Ramón y Cajal).

No soy un geólogo, ni un químico, ni tampoco físico ni biólogo: mi formación es de ingenierillo generalista. Con unas inquietudes que me han llevado a investigar por mi cuenta y riesgo en determinados temas. Uno de ellos responde a la pregunta de *¿la vida biológica es un acto de fe? ¿O es algo tan natural como la lluvia?*

Con esta mochila inicié más o menos en 2010 la senda que me llevó a husmear todo lo que me resultó interesante sobre el origen de la Vida. Muchos libros, muchos artículos, mucha página web. Sin más criterio que el que deducía al ir abriendo páginas que a su vez me llevaban al conocimiento de nuevos horizontes para explorar. Mi cabeza de jubilado - retirado, por si a alguien le gusta más esta palabra- me exigía tomar notas para no olvidar. Mi mente cuadriculada (me gustaría decir en su lugar “científica”) me llevó a enhebrar todas mis chuletas, encajarlas y darles una coherencia. A la vez me divertía, y mucho, el trabajo manual de edición y de ilustración.

El resultado ha sido un voluminoso y enciclopédico (para mí) tratado sobre lo que se teoriza hoy en día acerca de la Vida ¿A que suena sublime?

Pero, ¡ah! Todo tiene su “ah”, y en este caso estoy seguro de que ya lo habréis pensado: y este pardillo indocumentado... ¿a dónde va?

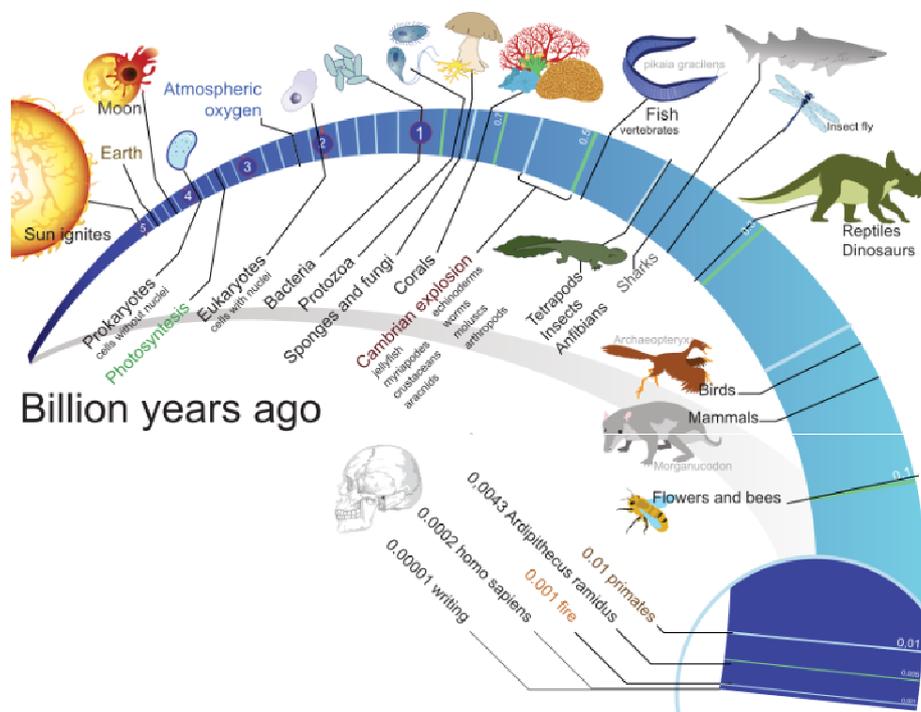
Pues bien, yo también me dije lo mismo: ¿cómo sé que lo que he recopilado, ordenado, escrito y dibujado está bien? ¿Cómo sé que está lo esencial y no falta algún aspecto crítico? ¿Habré metido la pata gloriosamente? Recordad que soy un ingeniero y que, cuando empecé mi

labor, del tema que me traía no sabía nada y que tenía, por tanto, la credibilidad que se merece un neófito. Es decir, poca.

Mi osadía me animó, con toda seguridad irresponsablemente, a poner en común mis escritos, aportándolos a la plaza pública del blog El Cedazo. Pero con un propósito bien claro: Qué los que supieran del tema me lo criticaran y así poder mejorar el conocimiento y estar seguro de que lo ya aprendido por mí estaba en el conjunto de las verdades. Un poco alambicado, pero en el fondo buscaba el que los lectores me ayudaran a corregir mi escrito. Desde El Cedazo hice mi propuesta pública: “... *que me acompañéis en mi aventura de bucear por los mares y ríos de la Vida. El objetivo es pasarlo bien y aumentar nuestra personal sabiduría. No seáis crueles conmigo, ni siquiera muy exigentes: me pongo bajo la tutela y amparo de nuestro padre fundador, Pedro -Gómez-Esteban, alma del blog El Tamiz-, que bien dijo un día, “antes sencillos que incomprensibles”... o algo así*”.

El resultado, más que satisfactorio desde mi perspectiva personal, fueron dos años y medio de labor e intercambio de opiniones, tras los que surgió el texto que ahora propongo.

Y dicho lo dicho, paso a comentar el programa del mismo.



La gran y excitante aventura: Desde el “encendido solar” hasta el cráneo del Homo sapiens (Wikipedia, dominio público)

En este libro voy a hablar de todo lo que pasó entre la acreción del disco de nuestro sistema solar hasta la época del *Homo sapiens*, de todo lo que sucedió en este intervalo y tuvo algo que ver con la aparición de organismos complejos. Con una apostilla final intentando argumentar como va a seguir el guión de la Vida.

Hablaré del escenario, cómo se creó, cómo evolucionó, cómo condicionó el entorno que dio a luz a la Vida terrestre y su evolución. Geología, climatología, física, química y biología. De vez en cuando alguna digresión teórica elemental, que me pareció oportuna para aclarar y hacer más colorido el relato. Voy a agruparlo, lo mejor que pueda y me salga, según el transcurrir cronológico de las edades geológicas.

Por delante nos queda:

- la gran formación del escenario, la Tierra;
- la primera química biológica;
- el primer actor celular;
- como se espabiló para buscar alimento y energía;
- ¡y se hizo el oxígeno!;
- los encuentros y desencuentros hasta la célula con núcleo;
- el último empujón antes de la gran representación: la pluricelularidad;
- el baile de los continentes preparando el escenario;
- la explosión de la variedad de hace 540 millones de años;
- el camino de la complejidad corporal que llevó a las nuevas y definitivas formas;
- la triple conquista de la tierra por las criaturas marinas;
- el camino evolutivo de los grandes seres;
- aparece el hombre racional y ético como un hecho natural;
- ¿hay o habrá vida además de la nuestra?

Un último y muy importante aviso por si no quedó claro: repito, soy un poseedor de mucha información y no soy experto en nada. Un amante del tema que ha jugado a periodista o notario del mismo. Este texto, aunque cerrado como archivo digital o formato en papel, sigue abierto: cualquier comentario que se os ocurra será más útil para mí, o para la curiosa comunidad lectora interesada por los caminos de la Vida, que para el que lo genere. Así que bienvenidos sean. Desde aquí y ahora, ¡gracias por ayudarme a corregir mis errores!

Me pongo a andar. Os invito a que paséis al próximo capítulo, en el que veremos al Hades en acción.

01. Hadeico

Iniciamos la andadura de nuestra aventura. En el capítulo anterior, introductorio, había esbozado las líneas generales que van a enmarcar nuestro caminar. Ahora ya no queda más que ajustarse las botas y husmear por el escenario.

Comencemos por el inicio:

Se hizo la Tierra y la Vida. De 4.570 a 3.800 millones de años

La Tierra primitiva, eón Hadeico (también llamado Hádico o Hadeano), duró aproximadamente desde hace 4.570 hasta hace 3.800 millones años, es decir, un 16% de la vida de la Tierra, y fue un eón de formación y asentamiento. En la mitología griega, Hades -de donde recibe el nombre este eón- alude al antiguo inframundo, la neblinosa y sombría morada de los muertos. Y realmente la Tierra en aquellos años se perdía en la niebla de lo desconocido, del calor y la confusión, como un infierno catastrófico y en llamas.

Hablaremos en este capítulo y siguientes de cómo apareció la Vida a partir de los más elementales átomos, incrementando su complejidad y cooperación, hasta la preservación de la información, replicación y transmisión de la misma. Hablaremos de los entornos donde surgió y donde, protegida, prosperó en forma de una primera célula procariota, la ancestral eubacteria.

Durante este período, probablemente, el Sistema Solar se estaba formando dentro de una gran nube de gas y polvo. En su centro se iba condensando la mayor parte de la materia que la constituía, al final un 98,8% del vecindario. La gran presión gravitatoria de esta masa encendió el horno del Sol, expulsando radiaciones que barrían los elementos más ligeros de sus proximidades -sólo iban permaneciendo los pesados- empujándolos hacia el espacio hasta encontrar una posición más cómoda. Allí, en cuatro zonas muy concretas, pudieron ya aglutinarse de acuerdo a los grumos que la gravedad iba formando. Se estaban gestando los gigantes de gas Júpiter y Saturno, y los de hielo Urano y Neptuno. Próximo a ellos, ya suficientemente lejos del calor de la protoestrella central, hacía el

suficiente frío -tanto que se le llama la “línea de hielo”- como para que sobre las motas de polvo de aluminio o de silicio que por allí se movieran pudieran congelarse poco a poco las ligeras moléculas de agua, metano y dióxido de carbono, formando cuerpos helados de todos los tamaños.



*Representación artística de cómo pudo ser la acreción del sistema solar, con el Sol central, la franja interior de planetas rocosos donde se estaba gestando la Tierra y la exterior de planetas gaseosos y helados
(Wikipedia, dominio público)*

El volumen tremendo de los cuatro planetas gaseosos impuso su orden: absorbieron a los pequeños cuerpos, y a los que no pudieron los fueron barriendo del mapa arrojándolos al espacio exterior, en donde quedaron como viveros de los futuros cometas que se acercan de vez en cuando al Sol. O bien los impulsaron contra los protoplanetas rocosos interiores, entre los que se encontraba lo que sería la Tierra, que se iba transformando poco a poco en un cuerpo independiente a medida que absorbía parte de esta materia y la de la nube de gas y polvo inicial. Habían pasado los 100 primeros millones de años de nuestro sistema solar.

Nuestra visión se aclara si en aquel caos hacemos foco sobre los “ladrillos” con los que se contaba en el proceso de gestación de la Tierra.

Por un lado *los gases*, entre los que dominaba desde el Big Bang el hidrógeno H_2 . A continuación por su cuantía el inerte helio He . Y posiblemente los productos de las reacciones del cuantioso hidrógeno con el resto de participantes según su abundancia: oxígeno, nitrógeno, carbono, azufre... (agua H_2O ; amoníaco NH_3 ; metano CH_4 y sulfuro de hidrógeno SH_2). La creciente radiación ultravioleta disociaría progresivamente al

amoníaco, dando nitrógeno N_2 ; y al metano, dando dióxido de carbono CO_2 .

Si nos fijamos en *los sólidos*, se tratarían de metales y silicatos metálicos. Los elementos sólidos más pesados, silicio, hierro, níquel, magnesio... estaban presentes, pero con unos porcentajes muy pequeños en relación al de los elementos que conformaban los gases. No obstante había lo suficiente como para que reaccionaran entre ellos. La base la constituyó el silicio, que se combinó con el oxígeno. El óxido de silicio $-SiO_2-$ se combinó con otros elementos formando los silicatos que predominan, hasta hoy, en el manto y la litosfera terrestre.

Estos eran los ingredientes de la mezcla en la batidora inicial.

Apretamos el ON y...

Hay varias teorías sobre la formación de la Tierra, pero la que parece tener más adeptos, y de la que hemos dado ya una ligera pincelada, es la de la *acreción* (agregación de materia a un cuerpo) *heterogénea*. Es decir, toda la materia que al final conformó la Tierra provenía de la nebulosa primigenia, ya como materiales simples próximos al núcleo inicial de atracción gravitatoria o bien como cuerpos de gran volumen captados por la cada vez más gran masa que iba compactándose. En definitiva: un planetesimal más dentro del conjunto de los que se iban formando en el incipiente sistema solar.

A lo largo de este proceso de acreción, la masa que se iba formando se fue calentando por el choque de los cuerpos que se unían al núcleo central y el calor de la desintegración de los elementos radiactivos que se iban captando, lo que hacía que se elevara considerablemente la temperatura del conjunto. Esta altísima temperatura hizo que comenzara a fundirse el hierro (lo que se conoce como **gran acontecimiento térmico**) ya que es menos refractario que los silicatos y tiene mayor densidad, comenzando a viajar por su gran peso hacia el interior, arrastrando al níquel. A lo largo de este viaje la presión producida por el peso de los materiales que iban quedando por encima incrementaba aún más la temperatura. Así fue que mientras aún se iba formando la Tierra, su **núcleo** comenzó a tener entidad propia. Según el geofísico de la Universidad de París Claude J. Allègre, eso sucedía probablemente hace de unos 4.440 a 4.410 millones de años, cuando aún la radiación solar barría los volátiles de la incipiente atmósfera.

Mientras, los silicatos (que en la actualidad conforman el 95% de la corteza terrestre) quedaban en las capas exteriores formando el **manto**. Se

supone que, a pesar de la intensidad energética del momento, estos silicatos nunca llegaron a un punto de fusión total y generalizada en toda la Prototierra, lo que hubiera formado un gran océano de magma. Si hubiera sido así se hubieran sedimentado según densidades, no habiéndose encontrado en la actualidad ninguna evidencia de este fenómeno.

En paralelo, el bombardeo de materia exterior seguía y, a medida que iban chocando más cuerpos atraídos por la *Prototierra*, éstos se iban fundiendo, adquiriendo sus componentes la dinámica general del conjunto. Muchos de estos cuerpos serían los cometas impulsados por las fuerzas gravitatorias de Júpiter, los cuales aportaban al planeta Tierra agua y dióxido de carbono, e incluso alguna molécula orgánica. El calor era tremendo, y más tras cada uno de los tremendos choques, de forma que el agua que se había condensado en los primeros protomares se evaporaba una y otra vez.



El Hades imaginado por el artista (NASA, dominio público)

Mientras todo esto sucedía, los elementos gaseosos y más volátiles, dadas las altas temperaturas que existían, iban permeando las capas sólidas profundas, saliendo al exterior. En un principio la gravedad no fue lo suficientemente potente como para que estos gases pudieran ser retenidos formando una atmósfera inicial. La Prototierra tuvo que esperar hasta tener un 40% de su masa actual para poder crear su primera atmósfera: aproximadamente con este tamaño fue capaz de retener el H₂O y a partir de aquí, a medida que iba creciendo, los gases y volátiles pesados. Los más

ligeros, entre otros el H_2 restante o el He, fueron barridos por el viento solar. Se estaba generando la **protoatmósfera terrestre**.

Hay varias hipótesis sobre la composición de esta atmósfera primitiva. La más antigua consideraba que la abundancia inicial del hidrógeno conllevaría una atmósfera de carácter reductor, con abundancia de vapor de agua (H_2O), amoníaco (NH_3) y metano (CH_4), como así sucede en otros planetas. Sin embargo, actualmente, y según el estudio de las rocas más antiguas (3.900 millones de años), se piensa que su composición sería muy parecida a la actual, aunque sin oxígeno. En esta atmósfera, provocada en gran medida por las emisiones volcánicas, que debían ser semejantes a las actuales, dominarían el CO_2 , el SO_2 y el H_2O , a los que se añadiría el agua de la evaporación de los océanos y el nitrógeno producto de la disociación del amoníaco. Por tanto no tendría un carácter reductor, sino más bien neutro. Aunque, bien pensado, ¿pudo una atmósfera ser continuación de la otra?

De este cielo neblinoso y espeso, tétricamente iluminado, a través del cual apenas se podrían ver las estrellas, caía el infierno: el bombardeo seguía. Parecía no detenerse nunca. Se cree que cuando la Prototierra rondaba el 60% de su tamaño actual tuvo lugar el episodio de formación de la Luna, debido al choque de la entonces Tierra con otro cuerpo del tamaño de Marte -Theia, la mitológica madre de Selene-. Este segundo cuerpo o bien se formó en el mismo disco de acreción de la Tierra o fue un cuerpo captado por la gravedad de la Prototierra. El hecho de que los materiales de la Tierra y la Luna sean muy parecidos hace pensar que lo que debió suceder con más probabilidad fue lo primero, cuando en los puntos de Lagrange -puntos de equilibrio gravitatorio entre tres cuerpos, en este caso el Sol, la Tierra y Theia- de la órbita terrestre fueron acreciendo dos masas principales que por alguna inestabilidad, y en aquel momento de esto no faltaba, colisionaron.

La enorme energía del choque produjo una elevación de la temperatura, con fusión y expulsión de los materiales licuados y volátiles. Los primeros quedaron orbitando el cuerpo principal, creando una atmósfera de rocas vaporizadas alrededor del joven planeta, mientras que los volátiles quedaron expuestos a la dinámica de la atracción gravitatoria y de los vientos solares; la mayoría se perdieron en el espacio. Los sólidos fundidos en órbita sobre la Prototierra formaron un nuevo disco de acreción independiente y, por fin, la Luna. En este proceso, la Luna quedó con un mínimo de volátiles, tanto libres como embebidos en su masa sólida. De ahí, se supone, la inexistencia de una atmósfera en ella.



Representación artística del choque entre la Tierra y Theia (NASA, dominio público)

El bombardeo seguía, aunque cada vez más mitigado al irse agotando el material libre disponible. El núcleo se iba conformando. La protoatmósfera se iba recuperando tras el choque lunar a partir de los gases y volátiles que exudaba el manto residual de la tierra.

A pesar de todos los fenómenos catastróficos que eran habituales en aquella edad de la Prototierra, **ésta se iba enfriando**. Inicialmente se hallaba prácticamente fundida en su totalidad debido a la creciente presión interna de su propia gravedad, ya que iba acumulando más y más material que venía del espacio exterior, todo ello unido a las aportaciones de energía calorífica de choque que se generaba en su caída violenta sobre la superficie del planeta. Es lógico el pensar que los efectos del gran acontecimiento térmico que la había fundido casi en su totalidad se iban poco a poco atenuando, al compás de la propia atemperación de estas circunstancias debido al agotamiento progresivo de la “basura espacial”.

Las desintegraciones de los elementos radiactivos en el manto y las deformaciones plásticas de su masa producidas por el estira y afloja de las mareas solares y lunares apoyarían también el calentamiento. Cuando el reloj iba por los cien millones de años, el espectáculo debía ser tremendo, con la Luna dando una vuelta a la Tierra cada cinco días y tres o cuatro veces más cerca de lo que lo hace ahora. Imaginemos qué tremendos tsunamis causaban las mareas. Sin embargo, también estas fuentes de energía iban menguando, al irse consumiendo los elementos radiactivos de

menor vida media y al alejarse la Luna de la Tierra, ya que, desde su aparición, se veía continuamente frenada en su girar alrededor de su planeta agarrada por los anclajes de la inducción de mareas entre ambas. Como dos niños que giran cogidos de las manos, cada uno conteniendo el giro del otro.

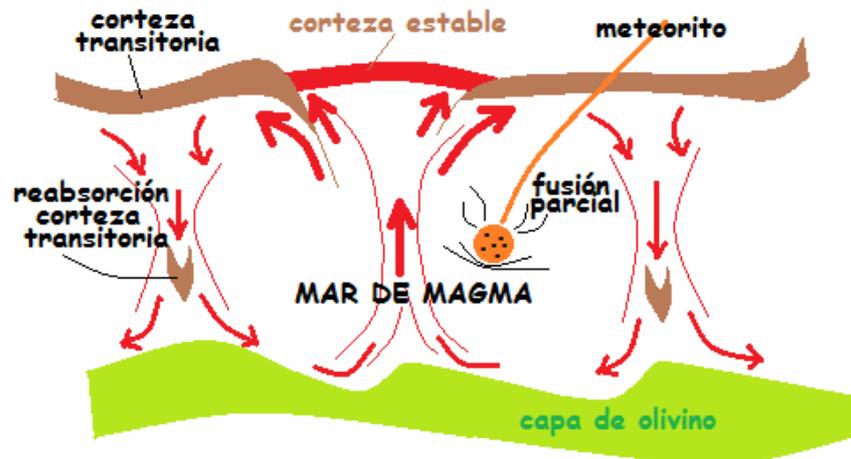
Por otro lado, la energía solar recibida iba en aumento, a pesar de que en aquella época era muy inferior a la actual, un 30% menos, puesto que a medida que en el Sol se iba produciendo helio a partir de las primeras fusiones del hidrógeno primigenio, se iba incrementando su eficiencia energética. No obstante, este incremento no era suficiente para saldar los procesos de enfriamiento por las causas mencionadas en el párrafo anterior.

Como consecuencia de todo ello, la Tierra iba perdiendo temperatura. Su motor de cambios, aunque aún potentísimo, se iba atemperando.

El núcleo interno se solidificó quedando aún una parte líquida que lo rodeaba. El núcleo líquido tenía dos características especiales. Era magnético, al estar constituido principalmente por hierro, y además estaba en movimiento, arrastrado por el giro del planeta al que se superponían los inevitables flujos convectivos en un mundo líquido y caliente. El campo magnético producido por este movimiento de cargas interactuaba con el propio núcleo en movimiento, induciendo corrientes que reforzaban el campo magnético inicial. Este proceso continuó y continuará mientras no cese la rotación terrestre -o se enfríe de tal manera que se solidifique el núcleo-, manteniendo una magnetosfera protectora y decisiva para el desarrollo de la Vida en el planeta, ya que constituye un eficaz escudo contra las radiaciones solares y cósmicas.

Mientras, en el manto fundido (océano subterráneo de magma), que también se iba paulatinamente enfriando, se producían corrientes convectivas que transportaban material desde el fondo hacia la superficie. En aquellos puntos donde había una mayor fuente energética interna calentando el manto se producía una mayor corriente vertical de material y, por tanto, una mayor aportación a la superficie del planeta. Esta acumulación de material teóricamente produciría un punto frío -menos caliente- en la superficie, lo que permitía que se fuera solidificando, apareciendo pequeños cratones de corteza (masas de tipo continental), posiblemente hace ya 4.400 millones de años, con una dinámica muy activa, ya que, o bien recibían más materiales a través de procesos volcánicos, o flotarían y se subducirían otra vez en el manto magmático, o bien serían destruidos por el alcance de un cuerpo espacial exterior. En

aquel momento la litosfera era sumamente cambiante, aunque se cree que hace 4.200 millones de años ya se habría formado una capa sólida recubierta por materiales que formaban su corteza.



Dinámica en la formación de la litosfera en el Hadeico (elaboración propia a partir de "Origen e historia de la Tierra", F. Anguita Virella)

La protoatmósfera también se iba enfriando. Era muy densa, mucho más que la actual; por eso su presión era bastante elevada, lo que permitió, a pesar de la alta temperatura, la condensación del agua y la aparición de la lluvia desde un momento muy temprano (hay diversas opiniones que se mueven entre los primeros 20 millones de años de la vida de la Tierra hasta hace 4.300 millones de años). Así se formaron los primeros **protoocéanos**, cálidos -entre 30° y 70°C- dada la temperatura del manto y de la atmósfera; y aunque hay diversas opiniones sobre ello -que oscilan entre pH's de 4 a 10- se supone que ligeramente ácidos por la disolución del CO₂ atmosférico -proceso por el cual este gas disminuyó en gran medida su presencia en la atmósfera- y con una salinidad mayor que en la actualidad.

A finales de este eón se produjo el **bombardeo tardío** que afectó a los planetas interiores del Sistema Solar, hace de 4.000 a 3.800 millones de años. Se piensa que este bombardeo fue el coletazo final de la transición entre la era inicial de formación de planetesimales y un escenario semejante al actual: el último arrastre efectuado por la gravedad de los planetas definitivos sobre la basura planetaria remanente en aquel momento. Otras teorías⁽¹⁾ especulan sobre la posibilidad de que este episodio hubiera sido producido por migraciones de Júpiter y Saturno dentro del sistema solar que desestabilizaron al Cinturón de Kuiper, lo que

hubiera llevado a multitud de cuerpos pequeños a caer a la órbita interna del Sistema Solar.



Representación artística de los primeros océanos. La Luna muy próxima a la Tierra en esos momentos. La configuración de cráteres corresponden a la actual (imagen: David A. Aguilar, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)

Este bombardeo tardío destruyó la mayor parte de las rocas primigenias. La corteza litosférica que vemos hoy, con algunas excepciones muy contadas, es bastante más joven que la edad de este período.

De hecho, en la actualidad no hay muchas evidencias de rocas de esta época. Los minerales más antiguos⁽²⁾ que se conocen tienen una antigüedad de aproximadamente 4.400 millones de años y se localizan en Australia. Se encuentran incrustados en otro tipo de rocas, distintas a las de su formación, tras un viaje geológico de subducción, cohabitación en el magma y vuelta a resurgir. Se tratan de circones (silicato de circonio, $ZrSiO_4$). Por lo que conocemos del proceso de generación de circones, necesariamente se debieron producir en aguas someras y templadas, de donde podemos imaginar que en un momento muy temprano de la vida de la Tierra ya había corteza litosférica y océanos templados.

Para encontrar rocas arcaicas hay que esperar a las que se formaron unos millones de años después, subproductos de la cocción en la chocolatera magmática que era la Tierra por aquellos años, recubierta de costras cambiantes. Los meteoritos caían por doquier destruyendo lo poco sólido que se iba formando. Sin embargo algo ha perdurado hasta nuestros días.

Hasta hace poco las muestras más antiguas de rocas de este eón se encontraban en el noroeste de Canadá y tenían una edad de 4.030 millones de años. Se tratan de gneises, rocas de origen magmático sometidas a un proceso de metamorfosis muy rápido. Sin embargo hoy se conocen nuevos datos correspondientes a rocas situadas en el cinturón de Nuvvuagittuq, en la costa este de la bahía de Hudson, en Québec, datadas en 4.280 millones de años, cuando la Tierra apenas tenía 300 millones de años.

Como hemos comentado, habría que esperar a la finalización del episodio del bombardeo tardío para que la litosfera comenzara a estabilizarse. Inmediatamente tras el fin de este apocalipsis encontramos las formaciones rocosas más antiguas. Son rocas sedimentarias (confirmando la existencia de mares profundos en donde se acumularon los sedimentos) de hace 3.800 millones de años que se encuentran en Isua, Groenlandia, e incluyen ya formaciones de hierro bandeado, si bien la mayoría de estas últimas se producirán más tarde, entre 2.500 y 1.800 millones de años.



Hierro bandeado (Wikimedia, CC BY-SA 2.5)

Las formaciones de hierro bandeado son rocas sedimentarias que contienen al menos un 15% de hierro en forma de óxidos y presentan una estructura formada por bandas, estando unas compuestas por el hierro y las otras por sílex (SiO_2) descompuesto. Son consecuencia de un proceso lento y progresivo de oxidación del hierro disuelto en los mares ácidos del Hadeico bajo la acción del incipiente oxígeno de aquella época.

Sorprendentemente, al mismo tiempo que se estaba produciendo el bombardeo meteorítico masivo parece que surge la Vida. Dada la relación

de los isótopos del carbono C^{12}/C^{13} en las rocas de Isua, se especula con la posibilidad de que ya en su momento –hace 3.800 millones de años- hubo vida. El C^{12} es preferido por los organismos vivos al ser más ligero y, por tanto, exigir su manejo menos energía. Podría tratarse de organismos con un metabolismo quimiolitotrófico (veremos en el capítulo 8 qué significa esto). Apoyaría la teoría el hecho de que los fósiles más antiguos conocidos se han encontrado en los estromatolitos de Warrawoona, Australia, y datan de unos pocos cientos de millones de años más tarde (3.500 millones de años).

En base a lo dicho en el párrafo anterior podemos conjeturar. La Tierra se engendró hace unos 4.570 millones de años, los primeros mares debieron aparecer, si hacemos caso a los circones, hace 4.400 millones, y la primera evidencia de posible Vida es de hace unos 3.800 millones, o quizás anterior, según lo que nos cuentan las rocas de Isua. Como las formas de vida que conocemos necesitan sí o sí agua líquida, parece que se tuvo una ventana de unos 600 millones de años para probar y tener éxito. Todo ello tamizado por un ambiente totalmente inhóspito, con un vulcanismo intenso, un cielo cargado de bombas amenazantes, abundantes aguas termales, sin oxígeno y expuesto a letales radiaciones solares.

En 2015 surgió lo que puede ser una de las grandes sorpresas en el conocimiento de la Vida, ya que gracias a un estudio⁽³⁾ de circones detríticos procedentes de la región australiana de Jack Hills, datados en hace 4.100 millones de años, se ha podido detectar en su interior la existencia de inclusiones de grafito con una proporción entre isótopos de carbono C^{12}/C^{13} coherente con la existencia de vida. Un paso atrás de ¡300 millones de años!

Hay incluso otras opiniones más extremas que estiman que la Vida pudo quizás aparecer con anterioridad, en una edad de la Tierra de pocas decenas de millones de años, lo cual es un tiempo muy reducido en comparación al que se había estimado anteriormente. De todas formas da la impresión de que la Vida fue un suceso con una alta probabilidad.

A través de diversos estudios como el llevado a cabo⁽⁴⁾ por Gerald F. Joyce, se ha comprobado en el laboratorio cómo las moléculas, cuando forman una población de un sistema químico, presentan una clara tendencia dinámica de actuación entre ellas, de forma que siguen principios que creíamos patrimonio de la biología: competencia por la materia prima, mutación espontánea, selección según eficacia, colaboración rayando en la simbiosis,... ¿parece cómo si estos principios fueran una ley general que actúa en la naturaleza, haciendo indistinguible

química y biología, que quedarían separadas solamente por su grado de complejidad?

En éste contexto lógicamente debemos pensar que antes de que se produjera el primer atisbo de Vida en la Tierra se debió organizar algo semejante, aunque extremadamente simple, en un mundo dirigido por la química no orgánica. En el escenario al que se llegó se moverían múltiples moléculas cada vez más singulares, con unas interrelaciones entre ellas que progresivamente se irían haciendo más complejas, capaces de cambiar su estructura, transmitir estos cambios y retroalimentarse: es decir, un atisbo de metabolismo, replicación y herencia.

Hay que partir de que la probabilidad de que esto sucediera en un salto o en unos pocos saltos es menos que mínima. Pero si imaginamos el camino de la complejidad dividido en un sinnúmero de pasos infinitesimales encadenados, una especie de inapreciables *saltitos progresivos en zigzag*, la cadena completa, aún teniendo una baja probabilidad de ocurrencia, la tendrá mayor que el cambio en un salto. El truco está en que la selección natural juega con los dados marcados, que impiden muchos de los infinitos posibles caminos en zigzag entre las posiciones de inicio y final. La dificultad incluso se aminora si pensamos en que la baja probabilidad juega a lo largo de un periodo temporal muy alto, del orden de cientos de millones de años, y que no hubo solamente una pista de pruebas, sino quizás millones de ellas sobre todo el planeta.

Partimos también de que la unión entre moléculas, como comentaremos más tarde, es un hecho relativamente fácil, regulado por las leyes físicas y termodinámicas que controlan sus “existencias”, y que están en el Universo desde que existe, actuando sobre todo, guste o no guste. En una gran mayoría de las uniones químicas se necesita una energía de cebado para sintetizar moléculas complejas a partir de elementos o moléculas más simples. Y se necesita un lugar “confinado”, donde las concentraciones de sus disoluciones sean muy elevadas como para permitir el encuentro fácil entre moléculas que acabarán uniéndose. Sobre la Tierra primigenia podíamos encontrar las circunstancias adecuadas: piezas para ensamblarse, agua para diluir y facilitar su movimiento, energía para salvar las dificultades de un enlace si éste es el caso y emplazamiento adecuado para que todo suceda. Un poco como en la probeta del químico.

Entonces interviene el “azar” probabilístico, al que le llamaremos *fuerza evolutiva*. En el zigzag del cambio unas posiciones resultaban más ventajosas que otras. Pensando en que la química de entonces era exactamente igual a la de ahora no es difícil imaginar que los volúmenes

poblacionales de los ladrillos de la Vida que se iban formando espontáneamente en la naturaleza, pasito a pasito, se iban acomodando en el escenario en base a sus intrínsecas condiciones de éxito: el que se sintetizaba con más rapidez se extendía más, copando así la materia prima que cada vez se iba haciendo más escasa en el mundo primigenio. Los primeros nuevos polímeros que consiguieron una adecuada estructura física tridimensional, en cuanto a forma geométrica y composición química, así como de reparto de cargas electromagnéticas que facilitasen su recombinación, tendrían más éxito en un mundo cada vez más carente de medios. Los polímeros que encontraron más rápidamente interrelaciones con otros que activaban mínimamente su velocidad de polimerización, o aquellos que iniciaron un camino con promesas de novedades, por fuerza tendrían que ser más exitosos en el entorno donde se encontrarán, ya que tenían más “boletos” premiados en la carrera para copar el espacio “existencial”. Los polímeros que antes encontraron un indicio elemental de replicación, aún imperfecta, abrieron una nueva dimensión para colonizar el medio. Podemos decir, como sabemos hoy en día, que acababan de iniciar el camino necesario por el que poco a poco iban a construir la biosfera.

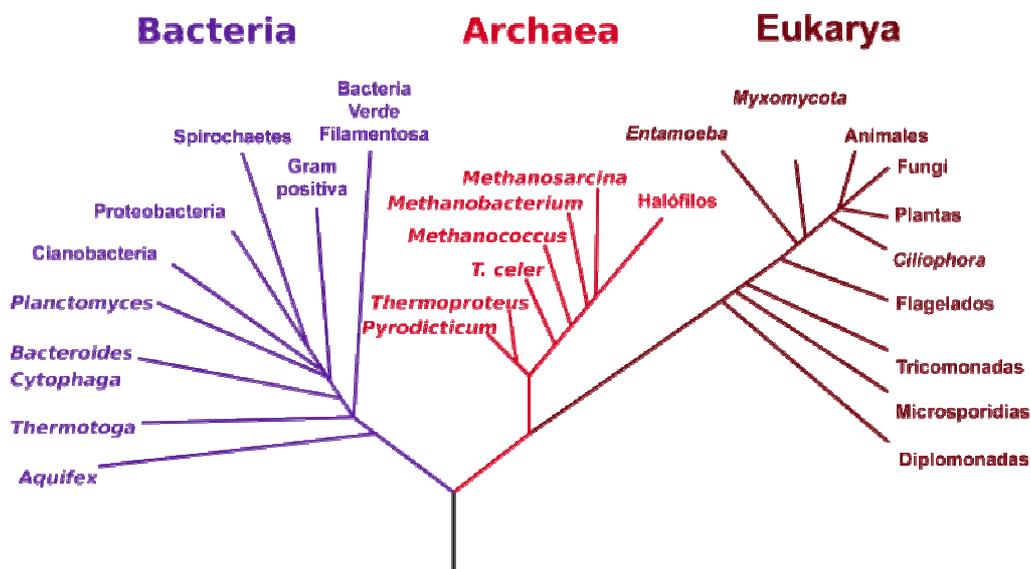
Estos procesos y otros más pueden ser rastreados al estudiar los *minisaltos en zigzag* siguiendo un camino de ida y vuelta: Partiendo de la sólida base de las características comunes del metabolismo y reproducción-herencia que conocemos en los seres vivos actuales, en busca del antecesor común vivo más antiguo -el LUCA, “Last Universal Common Ancestor”, del que hablaremos más tarde- para, una vez llegado a él, rescribir un camino de vuelta, reconstruyendo de nuevo la película viendo cómo se abre progresivamente el abanico hasta la realidad de hoy.

Mucho se conoce de esta aventura y mucho se basa en hipótesis más o menos bien fundamentadas. Es muy difícil reconstruir la cadena, casi imposible, pero lo que sí será siempre cierto es que la curiosidad humana estará continuamente imaginando e intentando demostrar la veracidad de los posibles eslabones. Nos anima el hecho de pensar que, si fueron una realidad a pesar de su baja probabilidad, también contaremos con una mínima probabilidad de reproducir sus etapas en el laboratorio.

En los seres vivos contemporáneos, ya sean animales, plantas, hongos o bacterias, hay una serie de elementos biológicos que son comunes, a pesar de que aparentemente no tenemos nada que ver unos con otros. Es decir, **elementos biológicos básicos que son comunes en la Vida**. Conocemos también bastante bien, o al menos creemos que esto es así al sentirnos apoyados por las muy serias herramientas de la ciencia y la tecnología,

cómo es la ramificación básica del árbol de la vida. Discutiremos sobre detalles... pero no sobre el fondo de la cuestión. De forma que todos estamos de acuerdo, por ejemplo, en que los seres eucariotas aparecieron con posterioridad a los procariotas, y que dentro de estos las eubacterias son anteriores a las arqueas, y por tanto forman lo que parece ser los organismos vivientes más antiguos de los que tenemos conocimiento. E inferimos que en aquellos eones iniciales las bacterias no debían ser muy diferentes a las actuales bacterias, ya que su forma de vivir ha demostrado ser una solución exitosa en un caldo medioambiental cambiante a lo largo de los últimos ¡¡3.800 millones de años!! Lo mismo podemos inferir, aunque a una escala temporal más corta, de otras parcelas de la Vida, como por ejemplo la existencia del huevo amniota que permitió a ciertos animales vivir sobre la tierra sólida y seca: una buena solución en su momento que aún mantiene su vigencia. Podemos pensar también que un “alguien ancestral” inventó el primer paso hacia el óvulo aislado y húmedo, alguien en cierto sentido con una bioquímica, en lo referente al huevo, no muy diferente a la de los actuales animales con los que comparte el singular invento.

Árbol Filogenético de la Vida



Unos miles de millones de años después de LUCA, habitante de la raíz más profunda del árbol de la Vida (Wikimedia, dominio público)

Es decir, confiamos con una cierta garantía de certeza en que *determinados aspectos básicos de la biología que son compartidos por diversos seres vivos ya eran propios de antecesores comunes*. Y así encontraremos una

serie de características, que de forma general son comunes en toda la biota actual, que provienen de un ancestro primigenio, y que como un testigo han pasado de mano en mano, de generación en generación, a través de los eones.

Todos los seres vivos compartimos la estructura del genoma: Un ADN-ARN formado por una cadena de pares de nucleótidos muy concretos. Compartimos también el mecanismo de replicación de estas cadenas, y compartimos el mismo código genético que permite traducir su información en cadenas de aminoácidos que forman las proteínas.

Todos vivimos en base a un software idéntico, el ADN, y un hardware basado en los mismos elementos: proteínas. El software está parcelado en genes, de distintos tipos y diversos cometidos, con diversas interrelaciones operativas entre ellos: tipos, cometidos, interrelaciones y operaciones compartidas casi hasta el detalle por todos los seres vivos. Los genes de la segmentación actúan de igual forma en todos los animales, e incluso se encuentran también en animales no segmentados. El hardware lo forman las proteínas, y las que son compartidas por organismos diferentes ejecutan en ellos prácticamente las mismas funciones. Los fosfolípidos de las células ejercen idénticas funciones en la constitución de sus membranas, sean las células que sean.

Las formas de conseguir la materia prima para que nuestros organismos perduren vivos son variadas, aunque en su mayoría representan la misma estructura de metabolismo. En cuanto a la forma de procesar esta materia prima, es en muchos casos muy semejante.

La energía necesaria para cebar el fuego de la vida y hacer que continúe se obtiene de forma variada, aunque con estrategias comunes muy concretas. Después de conseguida la energía desde el exterior, por regla general las bacterias la almacenan en forma de molécula ATP, el adenosín trifosfato, como las píldoras energéticas que su metabolismo irá usando según necesidades. Al igual que lo hace una vaca o una secuoya. El procedimiento de fabricación del ATP esta basado en un desequilibrio de protones entre ambos lados de una membrana celular, procedimiento que es general en todos los seres vivos. Incluso el primer paso de este proceso tan universal, antes de almacenar la energía en los enlaces del ATP, es utilizado directamente en el metabolismo de seres elementales.

La bioquímica de todas las formas vivas conocidas sobre la Tierra está basada en el carbono, y sólo en el carbono. Los oligoelementos constituyentes mayoritarios son los mismos en todos los organismos vivos,

carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno... Las biomoléculas presentes son idénticas, azúcares, proteínas, ácidos grasos... El 90% de la materia celular está compuesta por unos pocos representantes de estas biomoléculas, escasamente cincuenta.

Así que, a lo largo de este viaje de inmersión en el tiempo y la química orgánica en la búsqueda del origen de la Vida, encontramos identidades ya a partir de los escalones más elementales. Ahí deben estar sus orígenes. Ahí debemos buscar. Ahí estarán las piezas fundamentales, ahí las “probetas” en donde se diluyen y encuentran, ahí donde la energía se aprovecha, ahí es donde están las estructuras que se ven empujadas por las fuerzas evolutivas, donde se ubican las plantillas en las que se ajustan y replican, donde al final encuentran la autosuficiencia necesaria para mantener el motor individual y de especie en marcha, en plena libertad.

¿A qué esperamos para iniciar la búsqueda?!

En el próximo capítulo veremos las bases teóricas, algunas de ellas muy simples y conocidas, en las que se anclan los inicios de las moléculas orgánicas.

02. Algunas generalidades

En el capítulo anterior hablamos del escenario en donde se iba a desarrollar el drama. La Tierra comenzaba su andadura. Acabábamos planteando un hilo argumental sobre los puntos de encuentro de todos los organismos vivos, hilo que iremos desarrollando en un futuro, aunque hoy aún nos moveremos por temas muy generales, incluso elementales para la gran mayoría, que encuadran el camino. En un primer bloque de este capítulo la química es la protagonista y en él pretendo no sólo complementar el conocimiento con la presentación de los actores elementales, las moléculas orgánicas, sino también dejar en la mente de todos los lectores la idea de que los juegos de la química elemental, que más tarde dio origen a la química orgánica, fueron unos procesos naturales, elementales y obligatorios. La bioquímica tuvo que aparecer sí o sí. En un segundo bloque de este capítulo seguiremos con el relato biográfico, profundizando un escalón más en los misterios del inicio, aún dentro de los 770 millones de años que duró el Hadeico.

De las profundidades de este eón, entre fuego y explosiones, a través de un agitado caminar hacia la estabilidad, surgió como de la nada, empujados por las fuerzas universales, nuestro planeta Tierra y sobre él una misteriosa Vida. En este momento de su biografía vamos a intentar desmadejar, en la medida de lo que el conocimiento actual nos permite, cómo sucedió todo.

En el capítulo anterior fuimos manejando muchas palabras nuevas, diferentes realidades moleculares y actores desconocidos, como no podía ser menos casi en el inicio de esta biografía. Hablaremos de todos tarde o temprano, empezando a continuación con los más elementales, que no por ello dejan de ser menos trascendentales, en los cimientos de esto que llamamos Vida. Sin ello puede quedar la tramoya ininteligible. Ahí va, pues, un poco de química.

La Vida pudo escoger a su viejo patriarca entre varios de los habitantes de la tabla periódica de elementos químicos. Pero eligió al Carbono.

Nuestro amigo el carbono

Y el carbono organizó su trabajo echando mano de los elementos más abundantes del entorno que le rodeaba y que fueran compatibles con su

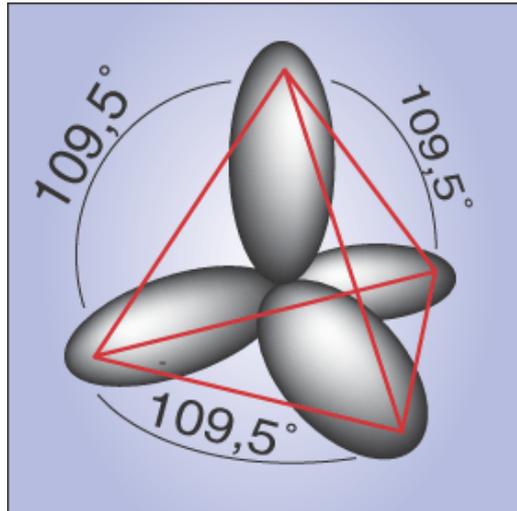
especial “fenotipo” -su cara visible-: formaron el equipo de los bioelementos. Los más frecuentes en los organismos vivos, de forma que entre todos ellos aportan más o menos un 96% de sus masas, son los siguientes: comenzando con el ya mencionado pivote, el carbono C, la relación continúa con el hidrógeno H, el oxígeno O, el nitrógeno N, el fósforo P y el azufre S. Luego, en menor proporción (3,9% en conjunto) participan el calcio Ca, sodio Na, potasio K, cloro Cl, yodo I, magnesio Mg y hierro Fe.

Todos ellos pueden unirse formando diversas asociaciones químicas, las moléculas. Un poco más abajo intentaremos desmitificar la “alquimia” de tales enlaces.

Así que la mayor parte de las moléculas que componen los seres vivos tienen su base en el carbono, el cual representa aproximadamente un 20% del peso de los organismos. Este elemento muestra una serie de propiedades muy diversas que derivan de su pequeño radio atómico y de que la capa más externa de su bagaje electrónico está formada por cuatro electrones que le dan una gran versatilidad y múltiples habilidades:

1. Ofrece una amistad universal: Su particular estructura de electrones le permite formar enlaces hasta con cuatro elementos distintos, lo que le da una increíble variabilidad molecular. A su vez estos enlaces pueden ser sencillos, dobles o triples, lo que quiere decir que puede agarrar con una, dos o con tres manos a la vez.
2. Sabe hacer fuertes amigos: Cuando se junta con otros elementos en una molécula, forma con sus compañeros enlaces de unión del tipo denominado covalente, que son muy estables y acumulan mucha energía.
3. Su red social es potente: Es un elemento que puede formar largas cadenas lineales o cíclicas, planas o tridimensionales, ya que se puede unir fácilmente a otros carbonos. Por lo que iremos viendo a lo largo de estos primeros capítulos se entenderá la importancia que para el metabolismo y la vida es el poder tener moléculas estructuralmente complejas.
4. Sabe amoldarse a las circunstancias: Los compuestos del carbono, aún siendo estables, no son inalterables y a la vez pueden ser transformados con facilidad en otros mediante reacciones químicas.
5. Sus facetas de comunicación son versátiles: Los compuestos del carbono no son solamente sólidos, sino que al unirse al oxígeno los forma gaseosos.

Quizás por todo ello fue el preferido por la Vida.



Los cuatro orbitales electrónicos más externos del átomo de carbono. En el centro está el núcleo atómico (Wikimedia, GFDL 1.2)

El principal aliado del carbono en la aventura de la vida es la molécula del agua: H₂O. El agua es el disolvente perfecto, por lo que es esencial en el mantenimiento de un medio en donde las moléculas químicas puedan moverse e interrelacionarse. Su capacidad de disociarse fácilmente en forma de iones H⁺ y OH⁻ le permite ser un excelente mediador en las reacciones de óxido-reducción esenciales en la dinámica de la Vida. Por otro lado, tiene una capacidad calorífica muy alta -absorbe bien el calor sin aumentar su temperatura- lo que estabiliza las condiciones biológicas en los organismos que funcionan mediante energéticas reacciones químicas. Podemos comprender, por tanto, que su función es absolutamente esencial: sin agua no hay Vida tal como la conocemos. Esta molécula es la más abundante de los seres vivos y representa, en promedio, el 70% de su masa. Aunque hay algunos campeones: en las medusas puede alcanzar el 98% del volumen del animal, y en la lechuga el 97% del volumen de la planta.

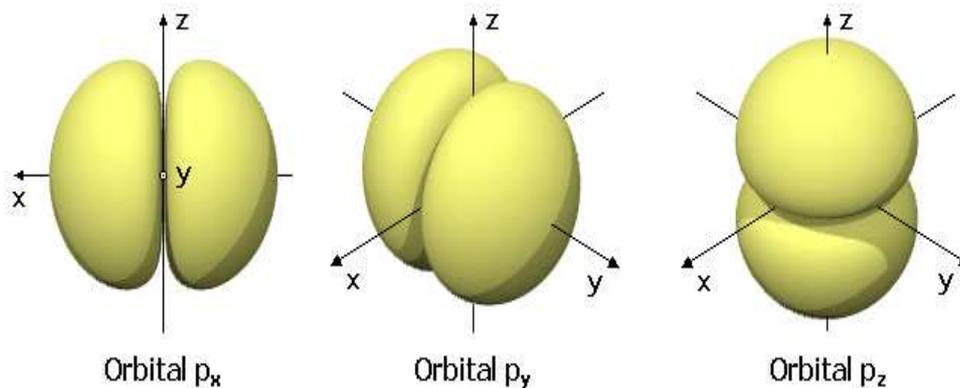
Un poco de química molecular

Me interesa ahora resaltar la estructura de átomos y moléculas, sus formas y tal como tienen distribuidas sus cargas eléctricas. Ya que, según sea, así se interrelacionarán formando compuestos, entre ellos los que se encuentran en la base de la Vida.

La imagen que voy a dibujar es la elemental de átomos y moléculas, aunque es tan sencilla que veremos cómo se parece a la de una pieza de “lego” imantada. Podemos imaginar a la química como una caja de versátiles piezas encadenables e intercambiables, gracias a la fuerza de atracción-repulsión de sus cargas eléctricas que actúan sobre una pista de

pruebas diseñada por las leyes físicas y termodinámicas universales del Cosmos.

Un átomo, y por extensión una molécula más compleja, son ínfimas, son aparentemente la nada. Pongamos una naranja en el centro de un campo de fútbol. Esta naranja es el núcleo del átomo, en donde los protones con carga positiva, su tarjeta de identidad, cohabitan con los neutrones. No esperemos encontrar a los terceros de la fauna atómica, los electrones, en el césped del campo de juego. Para ello tenemos que mirar más allá, por los confines del graderío de estadio. El número de este colectivo coincide con el de los protones del núcleo y con un valor de su carga negativa igual a la positiva de los protones, neutralizando así la carga total del átomo. Si la naranja es de un kilo, no espere más de un gramo de electrones revoloteando entre los asientos. Vacío. Un poco de materia, que es mucho, y una activa fuerza electromagnética.



*Ejemplo de cómo son los orbitales electrónicos de la segunda capa.
Raritos ¿no? (Wikimedia, GFDL 1.2)*

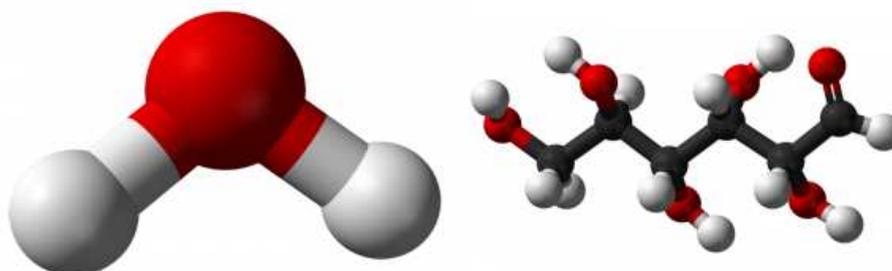
Los electrones no revolotean como un sistema planetario a lo largo y ancho de perfectas capas superpuestas, como las de una cebolla, aunque esta imagen es bastante útil para imaginar la configuración electrónica de los átomos. Estas partículas se posicionan rodeando al núcleo de forma que comienzan rellenoando su capa interior, menos energética, para una vez saturada con dos electrones llenar la siguiente hacia fuera con ocho y luego la siguiente hacia fuera, así hasta colocar una cantidad de pequeñas partículas negativas en un número igual al de los protones del núcleo. Pero las “capas de cebolla” tienen formas curiosas, como podemos verlo en la figura de más abajo que representa los orbitales electrónicos de la segunda capa. Cada electrón dibuja su propio orbital de acuerdo a sus características cuánticas y según su ecuación de onda. El resultado es una solución probabilística que no sólo podríamos imaginar como un lugar físico, sino

el lugar físico *donde es más probable que encontremos al electrón...* ¡cosas de la cuántica! Y tienen la forma y tamaño que tienen, no otro, ¡más caprichos de la cuántica! Ahora podemos comprender el por qué del vacío del átomo: los electrones tienen que poder encajar sus orbitales en este espacio. Que además alberga a multitud de partículas virtuales surgidas del borboteo cuántico. Pero eso es otra historia.

Es fácil entender que el átomo se relaciona con su entorno mostrando sus orbitales más externos –que no son más que las locas pistas de carreras de electrones con carga negativa-, los cuales actúan como tentáculos con los que formar moléculas. Pero no hay que olvidar que en su pequeño punto central se encuentran los protones con sus cargas positivas, que condicionan la energía y el movimiento de los electrones, es decir, condicionan las características de los orbitales sus formas y fuerzas. Todo ello hace que cada átomo se comporte como un pequeño imán, una pequeña pieza de lego imantada, con los brazos -algo así podemos entender que son los orbitales aunque no es exactamente correcto- exteriores, que son los elementos de unión mediante los que las piezas hagan “clik”. Y según sea su configuración, así se relaciona.

Los átomos, como todo en la naturaleza, tienden espontáneamente a buscar posiciones en un entorno energético “redondo”, como una piedra que bajo la acción de la gravedad no para hasta encontrar su posición estable en el fondo del valle. El óptimo energético lo encuentran cuando en su capa externa hay tantos electrones como teóricamente sea posible. Algunos están cerca de este óptimo por exceso, les sobran unos pocos electrones, y otros por defecto, les faltan otros pocos. Y ahí es donde colaboran unos con otros prestándose electrones, de forma que los átomos lleguen a formar una molécula que a su vez tenderá a instalarse también en una posición energética “redonda”. A veces estas uniones son prácticamente espontáneas: las piezas de lego que participan encajan espontáneamente como anillo al dedo. A veces hay que darles un empujoncito para vencer la repulsión negativa entre sus capas externas, sólo hay que buscar un poco de energía para cebar la reacción. Su entorno también tiene algo que decir, ya que influye en sus movimientos y velocidades, sus trayectorias, sus energías cinéticas, etc, circunstancias todas ellas que condicionan el baile de aproximaciones y choques. Incluso hay otras moléculas que espontáneamente se ofrecen como casamenteras, las catalizadoras, agilizando de forma exponencial la formación de la nueva molécula. Si todo es favorable, y la probabilidad de que así sea no es que sea precisamente baja, se formará un enlace y una nueva molécula químicamente más estable: la segunda ley de la Termodinámica manda. La

verdad es que nuestra experiencia constata que la química de la naturaleza dispone para ello de un manual absolutamente versátil.



A la Izquierda, representación tridimensional de la molécula del agua (dominio público) y a la derecha, la de la D-glucosa (dominio público). Las esferas representan los átomos: el carbono en negro, el oxígeno en rojo y el hidrógeno en blanco. Las barras entre átomos representan los orbitales moleculares, allí por donde aparece la densidad electrónica con mayor probabilidad.

Tras el anterior largo paréntesis teórico recojo argumentos y me concentro en la moraleja: *la unión de átomos y la configuración de nuevas moléculas no es un acto de magia, sino un suceso que la naturaleza propicia*. Si las condiciones de entorno, pastoreadas por las omnipresentes leyes fundamentales y universales del Cosmos, son medianamente favorables, *sucedará sí o sí*. Y llegaremos a estructuras complejas como la del azúcar de la figura anterior, o extremadamente complejas como la de la hemoglobina. Esta “involuntaria” dinámica llevó a los sorprendentes “imanes-lego” a construir la Vida. Y esto sí es una certeza para nosotros que estamos observando el final de la historia.

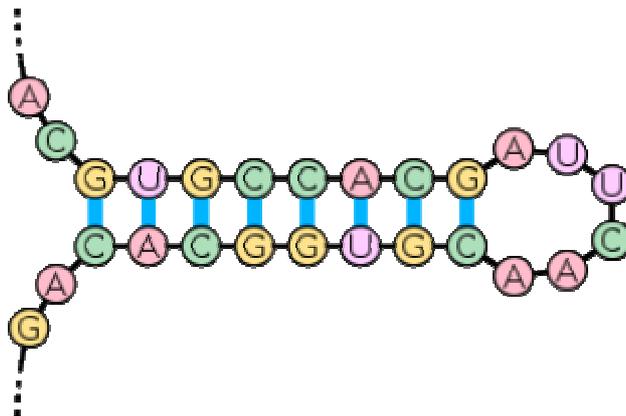
Continuemos ahora hablando, con nombres y apellidos, de los ladrillos con los que se ha ido montando el guión, ya en el ámbito de la bioquímica, ladrillos formados en su mayoría por carbono, oxígeno e hidrógeno. O quizás mejor, CO_2 y H_2O .

Las biomoléculas

Los bioelementos se combinan entre sí para formar las moléculas que componen la materia viva. Estas moléculas orgánicas basadas en el carbono las podemos agrupar en familias, que como podemos imaginar se van a diferenciar por sus estructuras moleculares. Aquí vamos a obviar estas estructuras para centrarnos en sus funcionalidades dentro del marco de necesidades de un organismo vivo, que precisa alimentarse, construir un

Son largas moléculas, con un **intrincado y esencial enmadejamiento estructural**, formadas por una cadena de aminoácidos, otro de los prótidos esenciales. La forma de la madeja depende de la secuencia de aminoácidos, su forma geométrica y los posibles enlaces “intramoleculares” (como puentes de hidrógeno) independientes de los propios que forman el polímero, siendo esta especial estructura enmarañada la característica esencial que condiciona su función. Así como sea su forma, condiciona los espacios de acoplamiento con otras moléculas y las posibilidades de enlaces adicionales químicos mediante sus grupos fosfato (PO_4^{3-}) o creando puentes de hidrógeno, entre otros.

La responsabilidad de la función de herencia recae sobre los ácidos nucleicos, el ADN y el ARN. De ellos hablaremos con mucho más detalle en un próximo capítulo. Baste decir aquí que sus moléculas están formadas por largas cadenas de lo que llamamos nucleótidos, un entramado molecular de cooperación a tres entre un azúcar, una base nitrogenada -unas especiales moléculas orgánicas que forman anillos- y un grupo fosfato -el ión PO_4^{3-} -. Sus funciones también se extienden al campo enzimático, facilitando las catálisis, y metabólico, fabricando proteínas y autorreparándose. Las cadenas del ADN están formadas por una hélice de doble hebra mientras que las moléculas de ARN pueden formar estas hélices aunque son de hebra simple, a veces cerrada sobre si misma.



La falsa doble cadena del ARN (Wikimedia, GFDL 1.2)

Una vez conocidos los participantes, profundizaremos en el **cómo**, cual debió ser la forma más plausible para que con estos mimbres pudiera representarse la función de la Vida.

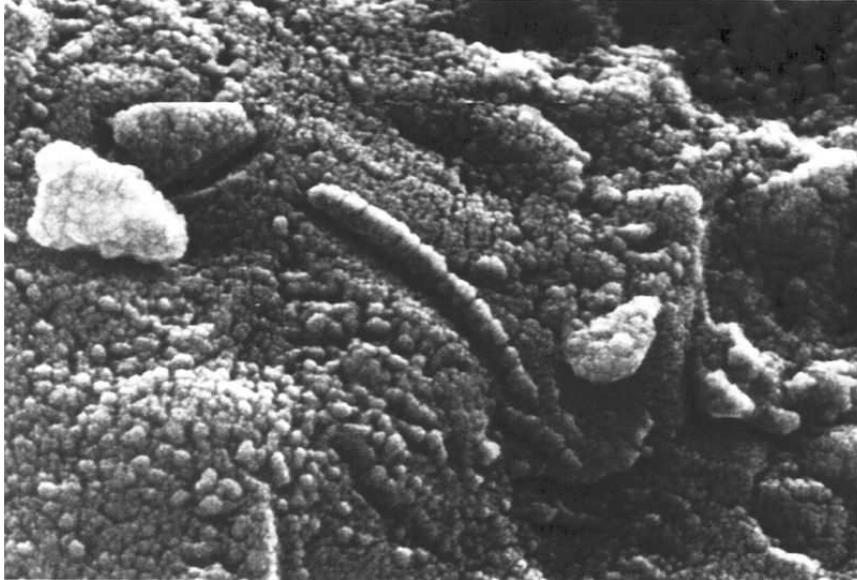
¿Cómo apareció realmente la Vida en la Tierra? ¿Qué es lo que mejor sabemos de ello?

Son muchas las teorías, y explicaremos las más importantes por su trascendencia a lo largo del camino del conocimiento y por sus sólidas bases científicas. Hay que decir que todo son especulaciones, pero con una alta probabilidad de que funcionen, al menos con una probabilidad más alta que la que tienen otras explicaciones puestas sobre la mesa. Conocer con exactitud lo que pasó es una utopía, ya que exigiría revivir la historia geológica, y esto es un imposible. Los seres vivos más próximos en el tiempo han dejado un reguero importante de fósiles, sin embargo la Vida más antigua ha dejado solamente unas pistas químicas, enmarcadas en un entorno ambiental al que podemos analizar con un grado de especulación que resulta confortable para la ciencia. A partir de todo ello hay que conjeturar lo que pasó, ponerlo en el escenario del conocimiento, contrastarlo y someterlo a una crítica continua.

Vamos a dejar de lado las teorías de corte aristotélico que postulan una generación espontánea de la Vida por estar científicamente más que superadas.

Hay teóricos que opinan que la Vida vino del exterior, la panspermia, aminoácidos a caballo de meteoritos y cometas que cayeron sobre la Tierra y que fueron la semilla para una expansión futura. Científicos tan prestigiosos como el británico Sir Fred Hoyle postulaban esta posibilidad, ya que consideraba que el inicio de la Vida en la Tierra comportaba una mínima e increíble probabilidad. Hoy se sabe que el espacio interestelar está repleto de biomoléculas. En 1969 cayó un meteorito en Murchison, Australia, en el que, al ser analizado, se pudo detectar restos orgánicos y de aminoácidos. Estos resultados se han visto repetidos en análisis realizados con otros meteoritos.

Hay un segundo hecho relacionado también con meteoritos, esta vez de origen marciano, el ALH84001 que fue encontrado en la Antártida en 1984. Los gases que encerraba corroboraron su origen en el planeta rojo. Con una antigüedad de 4.500 millones de años, debió de saltar durante una de las terribles y múltiples colisiones de objetos que se daban en aquella época en el sistema solar interior. Presenta unas vetas de calcita que se forman por infiltraciones de agua, una pista de la Vida, al menos del tipo que conocemos en la Tierra. Se hallaron también granos minerales de magnetita de posible origen bacteriano, moléculas orgánicas y unos cuerpos que bien pudieran ser bacilos, como se ve en la fotografía anterior (aunque hay también opiniones en contra).



Estructura del ALH84001 (Wikimedia, NASA, dominio público)

Sin embargo, si éste hubiera sido el germen de la Vida en la Tierra siempre quedaría en el aire la pregunta de *cómo se inició en el espacio*, fuera de nuestro planeta.

Si el origen físico de la Vida se produjo realmente sobre la Tierra, debió surgir progresivamente a lo largo de un proceso con raíces en un mundo de química abiótica y que desembocó en un mundo de química biológica elemental: a este proceso se le conoce como la síntesis abiogénica, nombre que proviene del griego α - “no”, β ιος- “vida” y γ ενεσις “principio”, el inicio de la Vida desde una “no-vida”.

Son muchas las mentes teóricas que han discurrido sobre cómo pudieron ser los inicios de la Vida, cómo a partir de los átomos más elementales se llegó a las moléculas complejas que gestionan lo que hoy llamamos Vida. Comenzando por las ideas del bioquímico soviético Alexander I. Oparin y del biólogo evolutivo británico J.B.S. Haldane, padres al alimón y desconexos de la abiogénesis, ninguna teoría por sí misma da una explicación completa, e incluso algunas de ellas son meramente especulaciones sin un soporte experimental, por otro lado difícil de conseguir dada la baja probabilidad de reproducir en un laboratorio aquellos desconocidos inicios. En el mundo de la ciencia hay dos corrientes principales de opinión, las que apuestan porque la complejidad se inició como un mundo de información y replicación, en donde el material genético fue perfeccionando su función, y las que argumentan que el metabolismo, la máquina interna de los organismos, apareció antes que los sistemas codificadores de información. Entre las del primer grupo se

encuentra la conocida teoría del mundo del ARN postulada por el premio nobel Walter Gilbert en 1986, donde el ácido ribonucleico desarrollaría funciones tanto de archivo de la información como de catálisis química. Entre las del segundo grupo está la teoría del mundo de hierro y azufre que postuló en 1989 Günter Wächtershäuser.

Alexander I. Oparin fue el primero que teorizó en 1924 una evolución espontánea molecular que daba lugar a ciertos agregados complejos, que bautizó como coacervados. Él había observado que los principales ladrillos de la vida orgánica, como podían ser los azúcares, los aminoácidos o las proteínas, se podían sintetizar a través de procesos de laboratorio que no diferirían en gran medida de las condiciones y lo que pudo haber pasado en la Tierra más antigua. Estaba convencido de que en las aguas de los océanos primitivos debieron formarse sustancias orgánicas muy complejas y diversas, semejantes a las que constituyen los actuales organismos, aunque también era consciente de que una cosa es un ser vivo y otra una disolución de moléculas, de tamaño más o menos grande, en agua. Y se puso a estudiar el mundo de las disoluciones coloidales de moléculas relativamente grandes, en las que observó una cierta anarquía e inestabilidad, entre las que de vez en cuando, a través de un proceso muy sencillo y espontáneo, se estabilizaban grumos de ciertas moléculas, decantándose como un sedimento o formando unos coágulos en equilibrio dentro del coloide. Todo dependía del tipo y estructura de las moléculas. A esos grumos, como ya hemos comentado, les llamó coacervados, del latín *acervus*, montón.

Los coacervados tenían una propiedad muy especial: habían condensado todas las moléculas de la solución coloidal primitiva de forma que ahora sólo se observaban unos grumos casi sin agua, rodeados de agua prácticamente pura, con la que no se mezclaban nunca. Ésta es la misma propiedad que tiene el protoplasma de las células vivas.

Dentro de los coacervados Oparin observó otra interesante particularidad: a pesar de su consistencia líquida, tenían cierta estructura interna. Las moléculas coloidales que los formaban no se encontraban dispersas al azar, sino que estaban dispuestas con una cierta estructura espacial y con una capacidad, en la mayoría de los casos, de absorber distintas sustancias que se encontraban en la solución que les rodeaba. Esto solía provocar transformaciones químicas en su interior. La consecuencia de todo ello es que los coacervados podían aumentar de volumen y crecer a expensas de las sustancias externas absorbidas en su núcleo, aunque no todos lo hacían por igual.

A partir de todo lo anterior le fue fácil colegir que la mezcla de distintos cuerpos proteínoides primitivos -que se habían formado espontáneamente como los aminoácidos interestelares- en las aguas de la Tierra primigenia debió de dar origen a la formación de coacervados, que evidentemente no se podían calificar aún como seres vivos, pero que llevaban la semilla de la vida en su interior. Y al igual que en el laboratorio, cada coacervado desarrollaría una química distinta, dependiendo de cómo se hubiera organizado su estructura interna y de qué tipo de moléculas se iba encontrando en el medio exterior. Algunas opciones resultaron útiles, se conservaron y crecieron, mientras que otras fueron desapareciendo, aisladas por la presión medioambiental. Un inicio de la estrategia de la selección natural.



Coacervados de Oparin (Wikimedia, CC 01.0)

Las que crecieron lo hacían hasta un tamaño permitido por las leyes físicas y termodinámicas, más allá del cual el coacervado se debía romper en dos o más hijos, que poseerían una química idéntica a la del antecesor, es decir, habían heredado una química ganadora. Y tendrían aún más ventajas los que crecieran más deprisa, aquellos que tuvieran una mayor capacidad de absorción de moléculas externas, con lo que su química interna se iría complicando y haciendo todavía más rápida. Se comprende perfectamente que estos coacervados, dinámicos en su química y reproducción y estables en sus repetitivos procesos de replicación de sus componentes, podían haber tenido grandes ventajas sobre los demás coacervados que flotaban en la misma solución primigenia.

Y así, siguiendo un camino de incremento de la complejidad dentro de la estabilidad, se llegaría a un ser metabolizante y replicante, al ser vivo más

primitivo. La teoría de Oparin, sin ser verdaderamente exacta, ha iluminado un camino probable, una senda de progresiva especialización molecular que pudo hacer posible el inicio de la Vida.

En los siguientes párrafos enhebraremos a lo largo de una misma historia cronológica lo que pudo ser el desarrollo de las biomoléculas a partir de la “nada”, historia compuesta por retazos del ya comentado extenso universo de teorías sobre la abiogénesis. En la lectura de esta exposición no se nos debe olvidar en ningún momento que se trata de un relato posible -bastante probable a la luz del conocimiento actual-, aunque especulativo, y no se nos debe olvidar tampoco que el proceso es el sumatorio a lo largo del tiempo de una sucesión de cambios infinitesimales, modelados en cada momento por su particular medio ambiente.

Los inicios son claros de puro simples: Vemos un mundo de gases y polvo. Los elementos químicos revolotean en la espiral de acreción de la Tierra. Poco a poco se van juntando y van creando alianzas. En un primer momento todo fue muy sencillo.

Ya hemos comentado cómo las leyes de la química, de la termodinámica y del universo en general actuaban de forma “impersonal” y silenciosa, pero insistente. El electromagnetismo es la base de la unión, cargas positivas con cargas negativas: intercambios de electrones, enlaces iónicos y enlaces covalentes.

De las moléculas sencillas se tuvo que pasar a la complejidad. La Vida necesita moléculas sencillas, como el agua, o el amoníaco, o el metano. O el dióxido de carbono, o el cianhídrico... moléculas que ya sabemos que estuvieron desde el principio presentes como resultado de procesos geoquímicos naturales.

Pero también necesita de la complejidad, así que el nacimiento de las moléculas orgánicas fue otra cosa. Como ya hemos comentado, hay múltiples teorías que postulan un posible camino, pero en general la hoja de ruta comúnmente suele pasar por los siguientes pasos:

1. Creación de ciertas moléculas pequeñas básicas para la vida, como los azúcares, nucleótidos o aminoácidos, ladrillos elementales de moléculas más complejas como los ácidos nucleicos -ARN, ADN- y las proteínas.
2. Generación de fosfolípidos, moléculas de ácidos grasos con átomos de fósforo, imprescindibles para la formación de membranas cerradas, elemento clave para el metabolismo celular.

3. Fusión de nucleótidos formando cadenas de ácidos nucleicos, inicialmente de tipo ARN.
4. La “conquista” de la función enzimática por algunos ácidos nucleicos al aparecer las ribozimas -enzimas basadas en la ribosa, componente del ARN-, que catalizarían la síntesis de pequeñas proteínas.
5. Diversificación funcional: los ácidos nucleicos quedarán como portadores de información genética, mientras que las proteínas catalizarán las reacciones metabólicas.

En el siguiente capítulo veremos como pudo arrancar la Bioquímica, la química orgánica.

03. La Química se apunta a lo bio

En el capítulo anterior explicábamos dos ideas que me parece importante recordar. En un primer bloque hablamos de algunas generalidades químicas, insinuando que el paso de la química prebiótica a la bioquímica y sus moléculas tuvo que ser algo inevitable en el mundo primigenio. Presentamos después las principales moléculas bioquímicas que tejerán y destejerán la Vida. Acabamos con un bloque acerca de las principales teorías acerca de cómo apareció la Vida sobre nuestro planeta.

Llegó la hora de avanzar a través de un tema bastante arduo: Teorías sobre lo que pudo ser el camino más posible desde la química prebiótica hacia el mundo de la especialización biótica. En este capítulo hablaremos desde los inicios incipientes hasta el momento en que la trama estaba preparada para dar el salto a la complejidad. Nos moveremos por un terreno resbaladizo en donde algunas teorías son absolutamente deterministas con el suceso -la Vida fue un subproducto de lo obligado- y otras absolutamente azarosas, evolutivas y competitivas -la Vida como el resultado de un largo camino de circunstancias-.

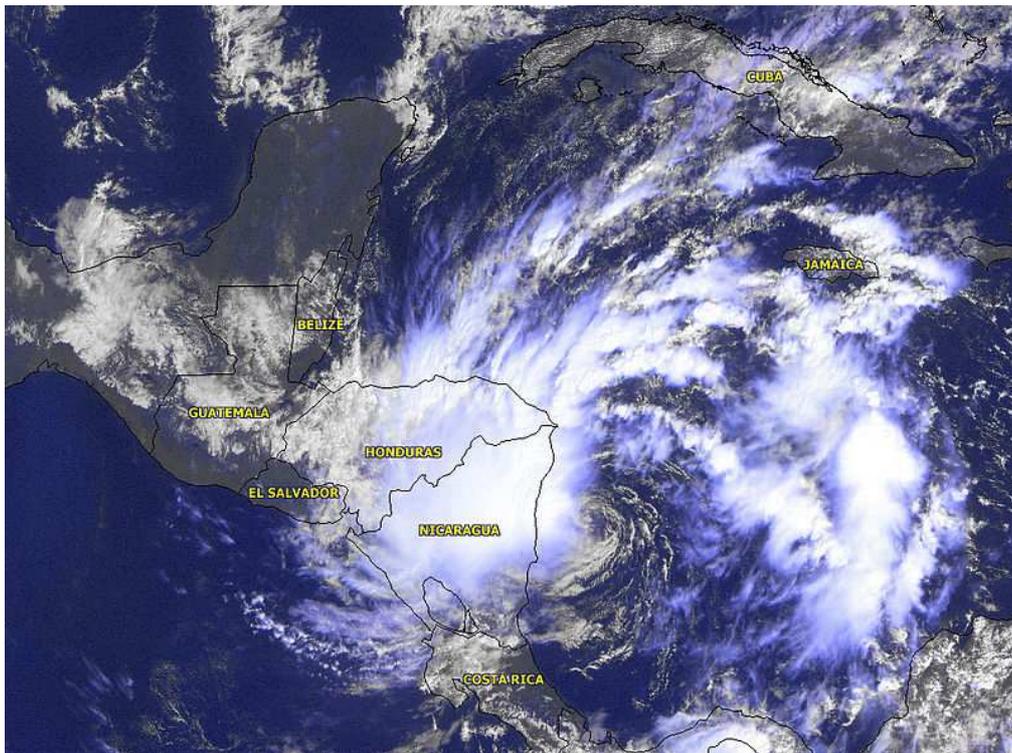
Es claro que lo químico inorgánico y lo bioquímico son estados muy diferentes. Pero quiero enfatizar el porqué con relación a la Vida. Un sistema puramente químico está avocado a la estabilidad que le imponen las leyes termodinámicas. No evolucionará nunca. Un sistema bioquímico vivo se mantiene de forma dinámica continuamente al borde del desequilibrio, lo que le permite ganar orden y evolucionar gracias a la incorporación de energía exterior al sistema. Materia “muerta” versus materia “viva”.

Dicho lo anterior tengo que introducir una cuña para manifestar claramente mi admiración y asombro por la inteligencia y empeño que han manifestado todos y cada uno de los científicos que se atrevieron con tan arduo tema. Algunos de ellos saldrán a relucir a lo largo de las siguientes líneas.

Seguimos entre los ocultos recovecos del Hadeico: desde hace 4.570 hasta 3.800 millones de años.

Un posible primer arranque de motores

Los avances de la física estadística, de la secuenciación genética y la comprensión más rica de la química interestelar, geoquímica y bioquímica, han hecho que los científicos puedan imaginar cómo los sistemas naturales podrían haber alumbrado la existencia de la Vida. Una de las teorías clásicas la ha enunciado el biofísico Harold J. Morowitz en su libro “*Energy Flow in Biology*”. La idea surgió al contemplar cómo actúa la geosfera en determinados procesos. Por ejemplo, la radiación solar es absorbida sobre la superficie del planeta produciendo diferencias de temperatura en diferentes lugares. Físicamente, los principios generales de la geofísica serían capaces de aliviar estas diferencias mediante sencillos procesos de difusión. Sin embargo este camino sería tremendamente lento debido a la gran resistencia a seguir una sucesiva cadena de estados próximos al equilibrio. En su lugar la geosfera lo realiza mediante el transporte intenso y eficaz de energía **a través de un flujo** que se concreta en un frente ordenado de tormentas convectivas, como pueden ser los huracanes.



Huracán Katrina, un ejemplo para Harold Morowitz de canal de flujo energético (wikipedia, dominio público)

En la Tierra primitiva la generación de energía era descomunal, y como consecuencia de ello se iba “embalsando” un volumen de energía muy

grande. Provenía de todos los fenómenos geofísicos y cósmicos que ocurrían en aquel momento del Hadeico y que ya conocemos. Por un lado la geoquímica estaba manteniendo un escenario de reacciones redox en donde el intercambio de electrones energéticos era la moneda habitual, mientras que por otro lado el sol enviaba su radiación de fotones generados en su particular horno de fusión. Este panorama acumulativo llegó a una situación inestable que pudo ser el detonador que inició la cadena de acontecimientos que trajo la Vida.

Esta situación de tensiones de la Tierra primitiva le sirvió a Morowitz de base para trasladar a la biosfera la teoría de creación de **flujos energéticos** que comentábamos al hablar de los huracanes. En particular, en cómo se aprovecha la energía de los enlaces químicos. En un mundo primigenio debían sucederse infinitud de reacciones redox, una de ellas la del hidrógeno molecular (un reductor) con el dióxido de carbono (un oxidante). La verdad es que no es fácil que esta reacción se produzca de forma espontánea en la naturaleza aunque sea exoenergética -libera energía-. Por el contrario, los organismos vivos consumen abundantemente estas moléculas para sintetizar otras diferentes, a través de sus procesos metabólicos, con unos rendimientos energéticos próximos al 100% ¿Cómo explica Morowitz esta habilidad? Propone que en un momento determinado, y como alivio de la situación de inestabilidad generada por el estrés de potenciales redox que abundaban en la naturaleza primigenia, se generó en la biosfera un espontáneo, rápido y nuevo canal de energía, que mejoró el aprovechamiento de los procesos redox, aprovechamiento que iba a permanecer en el tiempo: es como si se hubiera gestado un **cambio de fase** en el proceso de paso desde un estado inestable de tensión energética a un nuevo estado estable. Ésta es la idea fundamental.

Así se explicaría que el aprovechamiento del potencial redox por la Vida sea prácticamente del 100%. Esto pudo iniciarse, de acuerdo a Morowitz, con un “cambio de fase” en las condiciones geoquímicas, que se concretó en la nueva figura de un ciclo anabólico casi universal, mediante el cual los seres vivos, hasta hoy en día, montan sus estructuras. Se trata del ciclo del ácido cítrico o de Krebs, del que hablaremos en el momento oportuno, y que surgió en los primeros momentos de la Tierra primitiva.

También hemos dicho que existe otro estrés energético en la geosfera que lo produce la radiación solar. Antes del “invento” de la fotosíntesis esta energía, prácticamente en su totalidad, se transformaba en calor en los océanos gracias a múltiples y débiles procesos de dispersión elástica, que

eran los motores del clima global. Este es el argumento que también hace pensar a Morowitz en la espontánea generación de otro nuevo flujo de energía, que provocó un inédito “cambio de fase”, tras el que la energía solar fue aprovechada por biomoléculas, como la rodopsina o la clorofila, mediante procesos físicos de absorción inelástica. Y, además, con un rendimiento extremadamente elevado. La fotosíntesis.

Las consecuencias de estos dos “cambios de fase” conforman dos de los constituyentes principales de la Vida: los ciclos metabólicos y la fotosíntesis. Visto lo visto, a Morowitz no le quedó otra que postular lo que resultaba casi una evidencia: la Vida surge espontáneamente y de forma rápida como consecuencia de la geoquímica y la geofísica, en un planeta estresado por la superabundancia de energía. Lo que nos lleva a la reflexión de que en cualquier parte del universo en que se den estas circunstancias tiene que suceder lo mismo.

En base a estas ideas -que tienen un serio soporte físico-matemático en la mecánica estadística de procesos fuera del equilibrio, o de caos- Morowitz pensó que el sistema formado por la Tierra primigenia iba alcanzando progresivos estados de equilibrio *cuasi estable* que en un momento determinado se destensionaban mediante la generación de *flujos de energía*. Ello hacía que se fueran *traspasando umbrales*, a través de los cuales se producía algo semejante a un *cambio de estado*. Después de este proceso se llegaba a otra situación del sistema con un *equilibrio energético más estable* que el de partida. Y vuelta a empezar.

Morowitz cree que el camino se inició con un panel de diversas vías metabólicas, que se unificaron gracias al invento de la fosforilación oxidativa que creó las pilas de bioenergía en forma de moléculas de ATP (nos serán presentadas más tarde). Nuestro Último Antepasado Común Universal (LUCA) fue el que recopiló todos los avances, representando así el final del mundo exclusivamente abiótico. Con posterioridad se conquistó la fijación del nitrógeno, la innovación de la fotosíntesis complementada con el ciclo reductor de Calvin, las endosimbiosis, la multicelularidad... un proceso continuo de cambios de estado que poco a poco iremos conociendo.

El soporte teórico⁽⁵⁾ a esta hipótesis de Morowitz lo encontramos en los trabajos del físico Jeremy England. Apoyándose en la estadística, las matemáticas y las leyes universales de la termodinámica, en especial la del obligado aumento de la entropía global, ha demostrado que cualquier sistema local dentro del Universo, alejado de un equilibrio estable, con una

particular fuente de energía a su disposición y un sumidero de calor, puede evolucionar hacia otro estado, también alejado del equilibrio energético, mucho más ordenado (lo que parece contravenir la obligación de incrementarse la entropía) y más eficiente consumidor de energía (con la que soporta el aparente contrasentido del salto a un mayor orden). Este nuevo estado es irreversible y tendente a consumos cada vez mayores y más eficientes de energía, lo cual puede hacer la sucesión de “cambios de estado” obligatoriamente exponencial. La probabilidad de que esto ocurra es baja a menos de que, como hemos comentado, haya un determinado tipo de fuente de energía y de sumidero de calor que se acople con las específicas condiciones del sistema particular, lo cual acelera tremendamente, a escalas geológicas, los cambios de fase. Y esto es lo que sucede en la Tierra, en donde coinciden los materiales apropiados, con una fuente de calor apropiada como es el Sol, y unos sumideros de calor igualmente apropiados en la atmósfera y el agua oceánica.

Y así de una forma inevitable, dirigida por las leyes universales de la termodinámica, la Vida se habría ido manifestando cada vez más compleja, mayor y más eficiente consumidora de energía, como un medio para aliviar la acumulación de energía libre de la geosfera: parece por tanto que un mundo con Vida tuvo que ser más probable que un mundo sin ella. **Lo que apunta claramente a un proceso determinista y no azaroso.** La evolución determinista de la química del metabolismo, a través de todos sus progresivos posteriores “cambios de fase”, fue la que poco a poco fue condicionando la variabilidad de los organismos vivos, cuya aparición y fenotipos sería un subproducto de estas conquistas metabólicas.

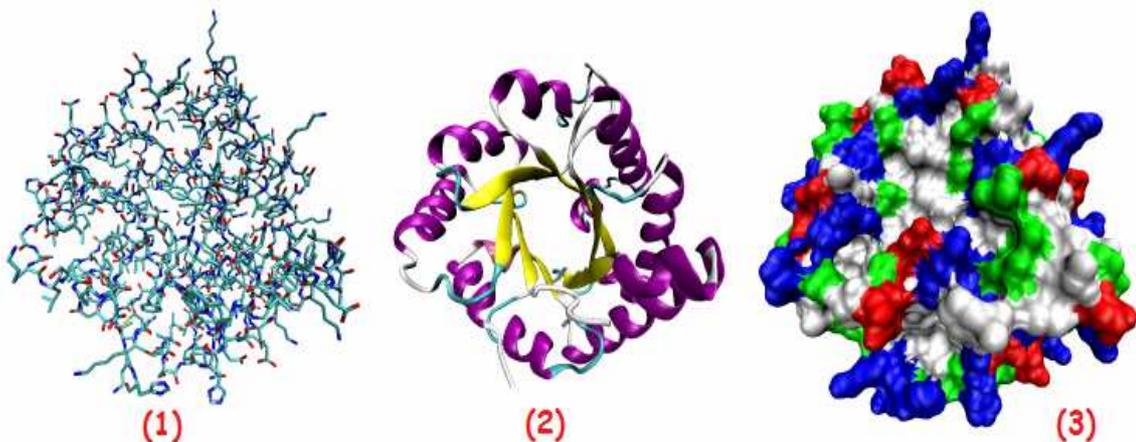
Primeras moléculas orgánicas sencillas de la química prebiótica

En un principio la química prebiótica iniciaría el camino sin ningún problema, tan sólo había que trabajar con moléculas relativamente sencillas que quedaron disueltas en las aguas primigenias.

Es fácil sintetizar de una forma casi espontánea azúcares, aminoácidos y algo parecido a elementales nucleótidos: los químicos norteamericanos Stanley Miller y Harold Urey lo consiguieron en 1953 con sus experimentos. Sólo necesitaron metano, amoníaco, agua, un poco de energía y algo de tiempo, no demasiado. Entre las décadas de los 50 y los 60 otro bioquímico estadounidense, Sidney W. Fox, demostró que los aminoácidos podían formar espontáneamente pequeños péptidos. En 1961 el también bioquímico, en este caso español, Juan Oro, obtuvo algunas purinas -un tipo de base nitrogenada del ADN o ARN- y en 1962, en otro

experimento, consiguió la síntesis de dos azúcares, ribosa y desoxirribosa, asimismo componentes de soporte de los ácidos nucleicos en el ADN y ARN. Últimamente, en 2013 y tras unos trabajos⁽⁶⁾ de más de diez años, un grupo de biólogos dirigidos por Michael Blaiber ha encontrado, a partir de un conjunto de 12 o 13 aminoácidos prebióticos producidos por sencillos procesos químicos semejantes a los existentes en la Tierra primitiva, el camino para sintetizar primitivas proteínas plegadas (del tipo β -trefoil). El plegamiento es esencial para el desarrollo de sus funciones. Los propios aminoácidos dispondrían por ellos mismos de la información necesaria para ello.

Un artículo⁽⁷⁾ publicado en 2015 explica cómo ha sido posible sintetizar experimentalmente, y de forma altamente eficiente, los monómeros fundamentales de la bioquímica -ribonucleótidos, aminoácidos y precursores de lípidos- a partir de dos sencillas moléculas: el ácido cianídrico, HCN, y el sulfuro de hidrógeno, SH₂. En la Tierra primigenia el primero habría sido generado por la interacción entre el carbono aportado por meteoritos y el nitrógeno atmosférico, gracias a las altas temperaturas alcanzadas en el impacto. El SH₂ habría surgido en la reacción de ciertos sulfuros metálicos con el HCN en disolución. Además es un gas típico de las emisiones volcánicas.



Estructuras primaria (1), secundaria (2) y terciaria (3) ya plegada, de una proteína (Wikipedia, GNU FDL 1.2)

Una vez formados en la naturaleza este tipo de compuestos orgánicos elementales, que serían inicialmente tan sólo unos treinta o cuarenta, se vieron en condiciones de seguir un camino de combinación entre ellos de forma que aparecieran polímeros con estructuras moleculares más complejas. Inicialmente serían polisacáridos, polipéptidos y polinucleótidos. Más tarde aparecerían los lípidos complejos. El proceso pudo ser tutelado según los principios generales definidos por Morowitz, o

quizás simplemente como consecuencia del juego de la competencia y evolución, tesis que planteamos en los siguientes pasos, que les llevó a encontrar unas formas termodinámicamente más estables, algunas de las cuales resultaron ser geométricamente muy laberínticas.

Estas formas tan particulares que adoptaban las cadenas de los polímeros que iban apareciendo eran como su tarjeta de visita: con una cara exterior real llena de recovecos físicos y una capacidad de generar posibles enlaces adicionales extramoleculares en los rincones de su estructura, lo cual facilitaba en alguna medida la complementariedad entre dos o más de estos polímeros. Se habría llegado a una tremenda versatilidad, a partir de la cual estas moléculas ya más “serias” interactuaban con el medio que les rodeaba, siendo capaces de ejercer un involuntario influjo sobre él, modificándolo o resistiéndose a ser modificadas, lo que podría ser considerado como algo semejante a una primitiva función catalítica. Sus inicios debieron ser muy débiles e inespecíficos, para irse potenciando con el paso del tiempo. Aquellas estructuras más estables y eficientes, con mayor capacidad de influir, serían las que sobrevivirían en el mundo prebiótico.

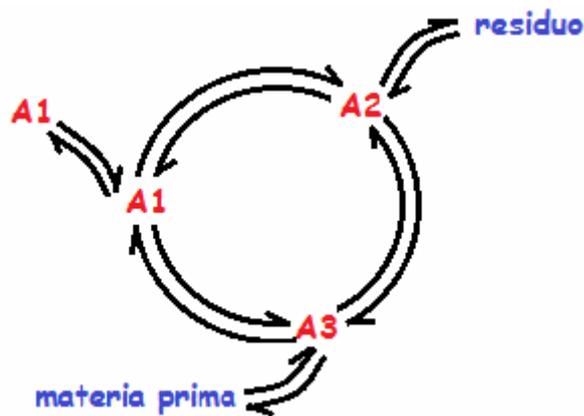
Supongamos pues un caldo lleno ya de estas moléculas de polipéptidos y polinucleótidos, una charca sobre una roca del acantilado o un lúgubre espacio en las profundidades más remotas de los océanos. Quizás habían llegado transportados por los meteoritos y cometas que caían sobre la Tierra. En aquel momento aún todo era química, y sólo química prebiótica. A partir de este escenario tuvo que derivar la complejidad.

Primeros autorreplicantes: moléculas “selfmade” sobre bandejas planas

La complejidad, con el tiempo, acabará llamándose *metabolismo* y *replicación*. Es decir, capacidad de tener una máquina en movimiento, generando no sólo las moléculas necesarias para seguir funcionando sino también la diversidad. Al estar sometidas a mutaciones, al autorreplicarse solas o con ayuda, al transmitir sus cambios en el proceso, iniciaron un camino para la herencia, paso previo e imprescindible al de modelado por la selección.

En esta senda la mayoría de expertos apuestan por un mundo inicial de química prebiótica en donde apareció *un primer replicante*. Una molécula que no iba mucho más allá que hasta una incipiente y simple reproducción de sí misma. Se encontró inmersa en un mundo que le imponía múltiples

interrelaciones, algunas de las cuales condujeron a un proceso cíclico de síntesis que se asemejaba a una máquina sin fin, y en el que dicha molécula participaba de forma principal. El mecanismo pudo ser algo parecido a un *ciclo catalizado por el propio primer replicante*, ciclo al que entraban moléculas del entorno y del que surgían otras como subproductos del mismo, entre las que se encontrarían moléculas iguales al replicante. Aunque sencillas, no dejaban de ser auténticas fábricas cíclicas de síntesis de un polímero elemental. El hecho de que la autocatálisis sea un proceso natural muy común en los sistemas cíclicos bioquímicos de la naturaleza nos permite pensar que este primer replicante no fue una entelequia teórica. La autorreplicación primigenia no sería muy sofisticada, no habría más complejidad en el proceso que repetir su recreación, sin un más allá, de una forma que podríamos llamar “rutinaria” y sin consecuencias inmediatas.



Ejemplo de posible ciclo autocatalítico del primer replicante A1 apoyado en una cadena de moléculas “familiares”

Este proceso no se correspondía aún a una replicación “vital”, ya que se produciría de una forma aleatoria y no persistente en el tiempo.

¿Por qué pensamos en autorreplicadores? Ya vimos en el capítulo anterior cómo las reacciones entre átomos y moléculas construyendo nuevas estructuras químicas era un proceso relativamente sencillo. Bastaba cumplir unas sencillas condiciones que estuvieran de acuerdo con la segunda ley de la Termodinámica. Pero dentro de este esquema la dinámica de las reacciones, como podemos imaginar, puede ser muy variada. Y en la química primigenia, cuando se tuvieron que producir las reacciones químicas formadoras de nuevas moléculas más complejas, las cosas tuvieron que ir muy deprisa dado el plazo tan corto entre la formación de la Tierra y el primer indicio de Vida sobre ella. Y aquí entra la idea de la catálisis, proceso por el que mediante la intermediación de una molécula ajena al núcleo de la reacción química, su velocidad se acelera

de forma exponencial. Y pensemos en el plus de velocidad que se añadiría si el catalizador fuera la misma molécula que interviene.

Se cree que en una disolución tridimensional, como podía ser el entorno de una charca o del fondo del mar, la generación espontánea de autorreplicadores debía ser bastante compleja dada la dispersión en que se encontrarían los actores que tenían que participar. Por otro lado, la unión de moléculas más elementales para formar polímeros se realiza normalmente mediando un proceso de condensación, durante el que se elimina una molécula de agua, y esto sería muy difícil en el seno de una disolución precisamente en agua. Así que ¿por qué no imaginar un mecanismo medianamente probable, mediante el cual se pudiera echar el lazo a los ladrillos necesarios para las estructuras moleculares de los autorreplicadores en un entorno en donde la autocatálisis fuera a la postre menos dificultosa? El proceso pudo darse sobre una superficie que limitara la dispersión a tan sólo dos dimensiones, sobre la que las moléculas que la recubrieran establecerían relaciones entre sí, aprovechando el “velcro” que supone la fuerza de sus enlaces químicos. Estos no serían demasiado potentes, ya que debían permitir la flexibilidad y fluidez suficiente como para que se produjera un fácil tejer y destejer de moléculas. Dado que los velcros de las moléculas de tipo orgánico suelen presentar anclajes electromagnéticos negativos, una especie de anzuelos aniónicos del tipo $-\text{PO}_3^{2-}$ o $-\text{COO}^-$, las superficies donde reposaban tendrían que ofrecer la cara contraria. Una posibilidad entre los materiales catiónicos lo encontramos en la pirita, que además forma sales insolubles que fácilmente se decantan produciendo sólidos. Volveremos con la pirita, S_2Fe , más tarde en esta historia, ya que es una de las bases de la teoría del “mundo del hierro y el azufre”. Recordemos que esta teoría la apuntó ya el bioquímico alemán Günter Wächtershäuser defensor, al igual que Morowitz, del axioma “primero el metabolismo”, por el que proponía que una forma primitiva de *metabolismo* precedió en el entorno de la biología a su contrapartida *genética*, y en el que intervendrían especies químicas y compuestos de hierro y azufre. La energía liberada a partir de las reacciones redox de los sulfuros metálicos no sólo estaba disponible para la síntesis de moléculas orgánicas sencillas, sino también para la formación de polímeros de largas cadenas.

Nos vamos a quedar en este momento procesal, después de levantar acta notarial de cómo pudo iniciarse la Vida y las primeras simples moléculas autorreplicantes. En un mundo escondido y casi abstracto que, al menos a mí, me resulta muy difícil de imaginar. Espero que el interés del tema haya hecho más llevadera la lectura, a pesar de su evidente aridez. A lo largo del

esfuerzo hemos convivido con un eslabón muy importante de nuestra historia.

En el próximo capítulo seguiremos su pista y veremos cómo se fueron complicando sus funcionalidades con la conquista de la información y la replicación a gran escala, lo que nos llevará hasta el mundo del ARN, fin de una etapa e inicio de algo nuevo.

04. Se inicia la complejidad

Seguimos en el eón Hadeico. Decíamos al final del capítulo anterior que las sencillas moléculas autorreplicantes y autocatalizadoras dieron un paso más. La complejidad de la Vida, basada en el metabolismo y la replicación y heredabilidad, necesitaba alguien que encendiera la mecha. Y fueron esas moléculas las que lo hicieron. En este capítulo haremos un compendio de algunas ideas destacadas dentro del mundo científico que intentan comprender y explicar cómo pasó todo.

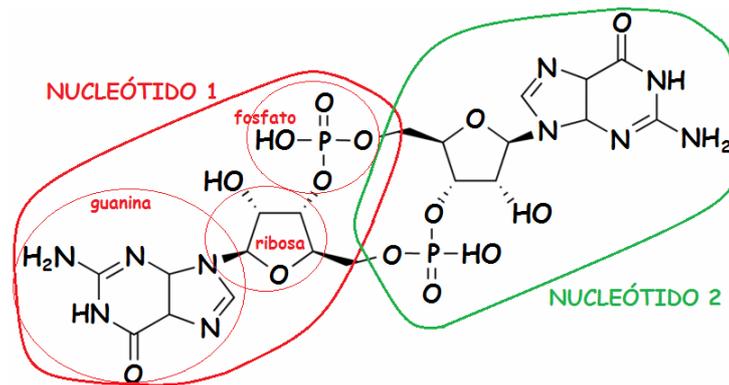
Crece la complejidad mediante la colaboración

La idea de que algo se gestó sobre una superficie es muy atractiva, ya que parece fácil que sobre ellas se pudiera iniciar la formación de ciclos autocatalizadores en donde aparecieran moléculas replicantes. Desde el punto de vista termodinámico es más sencillo. Lo que se argumenta es que *la formación de un polímero desde una superficie supone forzar menos el “antifísico” deterioro de la entropía*: el punto de partida es menos conflictivo, el desorden sobre una superficie es menor que el caos en una disolución tridimensional, y por tanto el salto atrás entrópico hasta el orden molecular va a ser menos costoso energéticamente, y por consiguiente más probable. Por otro lado, las moléculas fijadas por una superficie, al tener menos movimiento, disfrutarán de más oportunidades para asociarse con sus vecinas. Es más, una vez cebados los ciclos autocatalíticos, las moléculas contiguas, que con el tiempo aparecerán cada vez más como mutaciones del mismo ciclo, debían ser muy parecidas, presentando casi la misma estructura molecular.

En estas superficies se generarían por tanto unas “relaciones familiares” a nivel molecular, con preferencias de interacción -evidentemente no un acto volitivo, sino por el hecho de tener estructuras semejantes- que desembocarían en unos colectivos que tendrían que competir según la eficiencia de sus redes “sociales”: *los ciclos familiares más ágiles monopolizarían poco a poco los recursos*, los mismos que necesitaban otros ciclos familiares menos dinámicos, que irían desapareciendo con la inanición. Sobre las superficies quedarían los más exitosos, aquellos que hacían girar con más eficacia su ciclo, es decir, los que reproducían con menos errores las moléculas madres y las fabricaban con más generosidad

y a mayor velocidad, lo que les permitía no sólo expandirse, sino también compensar los intentos fallidos que sin lugar a duda ocurrían: *el ciclo autocatalítico más prolífico en la generación de sus componentes tendría más argumentos a la hora de tapar agujeros*, de compensar malos funcionamientos del mismo. No obstante, a la larga, mutar no llegó a ser tan malo, ya que la base de su futura evolución se encontraba precisamente en estas mutaciones.

Así que tenemos a nuestros replicadores moviendo su propia maquinaria de síntesis y polimerización, funcionando de una forma automática pero aún muy limitada en el mundo de la química prebiótica, cuando la complejidad estaba aún en sus inicios. *No había todavía moléculas enzimáticas especializadas* que agilizaran las reacciones y polimerizaciones. Para ser moléculas potentes, cercanas a las que conocemos hoy como partícipes de la Vida, tendrían que seguir desarrollando su estructura y hacerse más y más complejas. Aunque no les debió faltar quien les ayudara.



Molécula de cíclico-di-GMP (a partir de Wikipedia, dominio público)

Conocemos sencillas moléculas, como la **cíclico-di-GMP**, que actúan en las eubacterias actuales, los tipos más ancestrales de procariotas, interviniendo sobre sus moléculas de ARN de forma que estas últimas activan su función. Una muy elemental actuación de tipo catalizador. Y todo lo hacen sin la mediación enzimática de proteínas. Su estructura es muy simple y consiste en un elemental ciclo de ARN formado por sólo dos nucleótidos tipo guanina. A la vista de este tipo de habilidades bien pudiera ser que alguna especie de protoARN de este estilo mediara en los cambios moleculares del mundo de la bioquímica elemental, en donde la presencia de enzimas debía ser apenas testimonial.

Algunos de los ciclos catalíticos simples descritos en el capítulo anterior, la maquinaria de los autorreplicadores, *con el tiempo “aprendieron” también a colaborar y convivir con otros ciclos* como si el conjunto fuera

una entidad individual. Bien pudo pasar que el desecho de uno de ellos fuera justo la materia prima que otro necesitaba, y al revés. Los dos ciclos convivían “simbióticamente” manteniendo su simplicidad; y si lo hacían sobre una superficie aún mejor, el proceso resultaría más sencillo. Esta colaboración simbiótica entre moléculas permite imaginar que quizás leyes o usos que encontramos en la biología también funcionan en las moléculas simples dentro del mundo de la química.

Sobre esta base se han hecho experimentos que demuestran que es relativamente fácil sintetizar de una forma muy simple un buen número de compuestos, aunque el éxito de laboratorio se resiste en algunos muy importantes para la Vida, como es el intento de unión de una ribosa con una base pirimidina, componentes primarios de la cadena de los ácidos nucleicos.

Los problemas de la replicación abren la puerta de la heredabilidad

Hemos dicho repetidamente que la vida no sólo es replicarse y mutar. También hay que evolucionar, y para ello hay que conseguir poder transmitir la propia información, la propia estructura química y el fenotipo molecular. A esto se le llama **heredabilidad**, que no es una cosa simple, ya que para que tenga impacto en el propio entorno debe ser continua y variada en el tiempo, no un mero incidente aislado. La heredabilidad pudo comenzar con una mutación durante la replicación. Nuestros ciclos autocatalíticos, que progresivamente habían perfeccionado tanto su eficacia como sus redes de colaboración, son ya capaces de replicarse. Y además sus propios partícipes experimentarían mutaciones en las estructuras moleculares, mutaciones que transmitirán más tarde en los siguientes ciclos de replicación. Incluso podrán generar variabilidad *en los mismos ciclos de replicación como un conjunto* al transmitirse los fallos que se produzcan en el proceso, lo que en algún caso será el inicio de procedimientos más eficientes.

Durante el ciclo de replicación el polímero afectado estaba transmitiendo toda la información que lleva encriptada en su estructura molecular, de forma que cuanto más larga fuera ésta mayor podría ser la cantidad de información que transmitiera a su herencia, y a mayor información, mayor complejidad. Es fácil intuir que se encontró con un inconveniente, ya que había *una relación biunívoca entre una gran longitud de polímero y una gran probabilidad de error durante la replicación*. Esto en principio tampoco era muy malo ya que permitiría un gran abanico de alternativas, que puestas en la batalla de la competencia, iban a proporcionar con mayor

probabilidad un eficiente replicador. Pero, a pesar de todo, ello iba en contra de la “carta constitucional” del polímero largo y complejo, que consistía en que pudiera transmitir un buen volumen de información en el paquete de herencia con los mínimos errores. Su dilema era por tanto: longitud/error vs. longitud/información.

Está demostrado que hay que superar una determinada **tasa umbral de fiabilidad** para poder construir largas cadenas moleculares, imprescindibles para alcanzar complejidad. Y los polímeros del mundo prebiótico no podían ser generosamente largos, ya que aún no se había “inventado” la función enzimática que les ayudara a traspasar este umbral: los polímeros debían funcionar solos. La pescadilla se seguía mordiendo la cola ya que, a su vez, para que aparecieran enzimas eficaces se necesitaban moléculas de largas cadenas que pudieran enmadrarse y presentar así una estructura geométrica y de enlaces químicos suficientemente compleja como para realizar la función de robot ensamblador de moléculas. Pero ya hemos dicho que en el poco fiable mundo prebiótico esto era un imposible: dada la alta tasa de errores en las replications, los polímeros no podían ser demasiado largos. Si hablamos de algo semejante a un ARN, estaríamos hablando de quizás 10^3 a 10^4 nucleótidos. Se estima que el genoma humano tiene alrededor de 3×10^9 pares de nucleótidos.

Este entorno plantea un problema que parece irresoluble y que se conoce como la *paradoja de Eigen*: para incrementar la complejidad se precisaba transmitir mucha información, por lo que las moléculas que podían hacerlo debían ser largas. Pero en el mundo primigenio las cadenas eran muy cortas, con un índice de fiabilidad no muy elevado. Se precisaban moléculas “obreras” que agilizaran las polimerizaciones y así conseguir moléculas más largas y con alta fiabilidad en la replicación, es decir, se necesitaban enzimas. Pero las enzimas eficientes precisan de largas y enrevesadas cadenas moleculares imposibles de conseguir en aquellos momentos. ¿Cómo resolver el dilema?

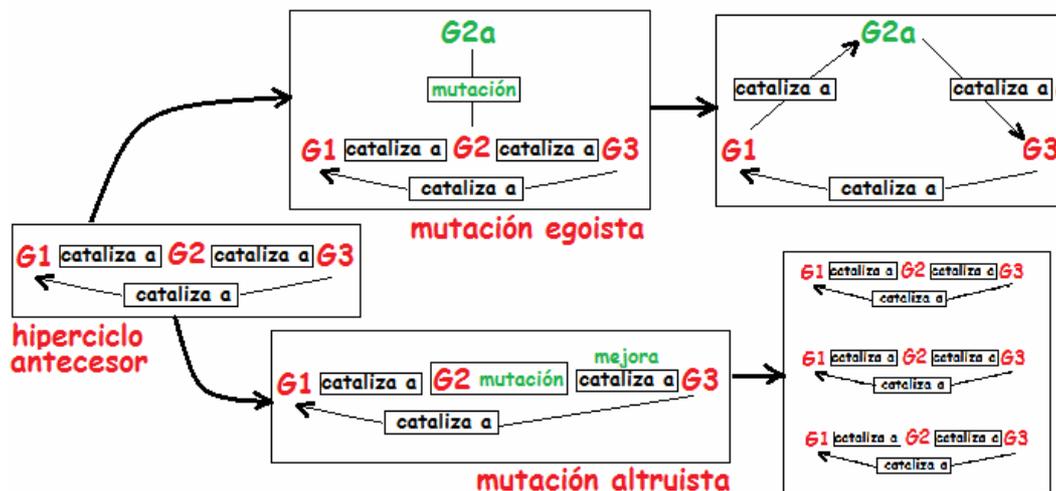
El método general pudo estar en la replicación por “plantillas” ya que se ha comprobado que la mayor fiabilidad del proceso se da en aquellos casos en que la replicación se realiza en base a la copia de estructuras moleculares por este procedimiento, es decir, que tu propia estructura pueda servir de molde para la replicada, como sucede con los ácidos nucleicos actuales. Eso permite pensar que la replicación por “plantillas” pudo ser la solución, ya que sobre un mismo polímero bien pudieron coevolucionar a la par las dos adaptaciones, apoyándose la una en la otra: largas cadenas junto a

poder catalizador, lo que permitió la gestión y heredabilidad de mucha y fiable información. Pero también hay otras ideas.

Apoyados en las ventajas de la colaboración

Quizás la base de la solución de la paradoja de Eigen se encuentre en alguna de las dos teorías siguientes. Se trata, por un lado, de la “**cohabitación de genes**” -utilizaremos ya la palabra *gen* para definir a las cadenas de información que se replican- sin que existiera competencia entre ellos, quizás moléculas de una similitud estructural, seguramente tipo protoARN, componentes de una misma familia evolutiva. Nos imaginamos a muchos polímeros cortos que se aliaban para dar una *apariencia funcional* de cadena larga.

Otra posibilidad, hoy por hoy teórica, pasa por la existencia de **hiperciclos**, una cadena de “protogenes” (en el sentido de autorreplicantes portadores de información) en la que cada uno de ellos realizaría algo parecido a una función enzimática de catalización en la síntesis de otro, y este a su vez de otro, y este tercero a otro cuarto, hasta cerrar el círculo con un gen que ayudara a catalizar al primero. No habría una cadena única, larga, sustentadora de la información, sino que ésta estaría repartida entre poseedores parciales de la información, cada uno de ellos autorreplicantes, propiedad ésta que no la tendría el hiperciclo como una unidad.



Árbol de alternativas de mutaciones dentro de un hiperciclo

Cada uno de estos genes, durante sus replicaciones, iría acumulando mutaciones; algunas los harían más atractivos a su correspondiente enzima (la que participa en su catálisis, es decir el gen anterior de la cadena) mientras que otras mutaciones mejorarían su habilidad catalizadora. En el primer caso podría surgir un nuevo hiperciclo en donde el mutante

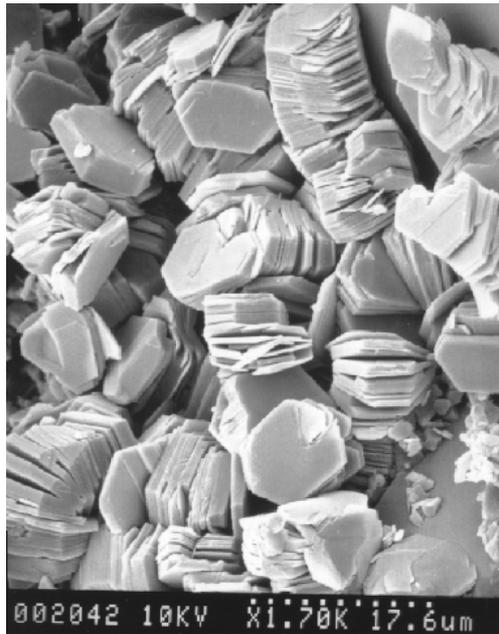
sustituiría al mutado perdiéndose el ciclo inicial (mutación egoísta) y en el segundo caso dando “alas” al hiperciclo, ya que uno de los pasos sería más eficaz, más prolífico, lo que supondría una ventaja para el conjunto en su capacidad generadora (mutación altruista). Se ha podido comprobar que si esto *sucede en un entorno abierto* los nuevos ciclos que surgen tras una mutación egoísta se dispersan y sobreviven, mientras que los ciclos consecuencia de mutaciones altruistas no consiguen una masa crítica como para imponer sus ventajas. Situación a la que se le da la vuelta si el *hiperciclo está confinado dentro de una membrana*: en este caso, si la concentración de genes en el interior es baja, la tendencia es a que el efecto positivo de los altruistas logre contrarrestar el negativo de los egoístas, permitiendo al hiperciclo reproducirse con eficacia, incrementar su población y expandirse con éxito siguiendo la división de los compartimentos donde están confinados. Suena a que algo como una célula debe ser un lugar de éxito ¿verdad?

En la Universidad Estatal de Portland se ha conseguido⁽⁸⁾ recrear por primera vez este tipo de redes químicas de ácidos nucleicos cooperadores (Nilesh Vaidya y colaboradores, 2012). Se fabricaron tres tipos de moléculas de ARN defectuosas que podían repararse entre sí, de tal modo que A reparaba a B, B reparaba a C y C reparaba de nuevo a A. Al ponerlas juntas se observó que la red colectiva y de cooperación funcionaba bien y más eficazmente que con moléculas no colaboradoras. Hace tiempo ya se sabía para el caso de tan sólo dos moléculas participantes, pero el experimento de la universidad de Portland ha demostrado que con tres también funciona, lo que abre la puerta a redes con más moléculas de distinta clase: si se ha podido pasar de dos a tres, entonces también se debe poder ir de tres a cualquier otro número. Estas redes son aún más versátiles en el caso de que las moleculares participantes tengan estructuras geométricas que les permitan acoplarse espacialmente, lo que a la larga puede desembocar en la polimerización de una larga molécula.

¿Pueden los hiperciclos ser el origen del éxito de los replicadores de largas cadenas con un gran potencial de información? Al menos es una teoría plausible. No obstante, no es todo tan fácil, nos queda mucho por demostrar. De entrada, la generación “espontánea” del ARN es muy problemática. Se ha logrado sintetizarlo en el laboratorio a partir de una disolución de nucleótidos, con la presencia de una semilla iniciadora en forma de molécula del tipo ARN y una enzima *sintetasa*, también conocida como *ligasa*, (las que se encargan de agilizar la síntesis de moléculas). Un experimento demasiado a la medida como para poderlo imaginar en el

mundo real, y menos aún en el mundo primigenio cuando aún no habían aparecido las enzimas. Sin embargo algo así debió suceder, quizás a través de un hiperciclo.

O bien todo pudo empezar aún antes, según la hipótesis que maneja el químico y biólogo escocés Graham Cairns-Smith, en la que postula que los primeros “genes”, como elementos portadores de información y autorreplicadores, no fueron de ARN sino de arcilla, en un mundo donde se producía fácilmente su interrelación con pequeñas moléculas orgánicas.



Cristales de caolinita, uno de los ejemplos de cristales de arcilla propuesto por Graham Cairns-Smith (NASA, dominio público)

La arcilla -la nata de la disgregación de las rocas- se forma rápidamente a partir de una disolución saturada de los iones adecuados (aluminio, magnesio y silicio) reproduciendo en su crecimiento, capa a capa, las irregularidades de su estructura. Los iones forman dibujos irregulares que pueden atrapar moléculas aniónicas. Sus cristales crecen a partir de una semilla del mismo material, pudiendo romperse cada uno de ellos de forma que cada trozo tiene la capacidad de constituirse en otra nueva semilla. A partir de la aparición de los lógicos errores de la configuración iónica durante el crecimiento del cristal es como se puede almacenar en su superficie información variada. Si estos errores se transmiten al romperse el cristal podríamos hablar de herencia. Este proceso se pudo iniciar fácilmente en el momento en que una disolución saturada de silicatos empapara una piedra porosa de arenisca, en la que podrían crecer cristales

variados de arcilla con diversos errores. Algo parecido a una “plantilla” con información.

Ahora pensemos que sobre esta plantilla física se van depositando determinadas moléculas orgánicas que también estarían disueltas en las aguas primitivas. Poco a poco irían adaptándose a las características de la arcilla, que a fin de cuentas está actuando como un catalizador inorgánico - necesitamos un catalizador para la primera síntesis del ARN-, aprendiendo su “información” e imitándola con mayor eficacia: la arcilla habría sido como el andamio sobre el cual se favorece la generación de un ácido nucleico, que quedaría como único agente al desaparecer el andamio.

Con ello obtendríamos cadenas muy cortas de ácidos nucleicos. Que tienen que crecer para llegar a ser un ARN plenamente funcional. La película continuaría a partir de la idea de que entre la variedad de estas cadenas de ácidos nucleicos generados sobre la catalizadora arcilla, alguna tuviera una estructura sui géneris que pudiera plegarse de forma tal que le permitiera comportarse como una enzima de ligamiento, lo que se conoce como *ligasa*. Esta enzima ayudaría a unir a parte de las cadenas compañeras de nucleótidos, hasta llegar a un punto tal que alguno de estos nuevos polímeros pudieran también plegarse de tal forma que actuara como catalizador de la replicación de algún compañero resultante también de la acción de las ligasas, lo que se conoce como un ARN *replicasa*. Y con eso se podría haber llegado a un ARN primigenio replicador y enzimático.

La teoría no es una entelequia y puede ser posible, como así lo podemos comprobar en los múltiples casos que observamos. La arcilla montmorillonita puede actuar como sustrato que promueve la polimerización de nucleótidos de adenina, uracilo y sus derivados. Incluso cadenas de ARN de hasta 40 eslabones. Además en su superficie este ARN permanece muy estable, más que en una disolución acuosa tridimensional. Es interesante también conocer el resultado de experimentos con priones - un tipo de proteína con un plegamiento erróneo de su molécula-, los cuales son capaces de unirse a partículas de arcilla y abandonar estas partículas cuando la arcilla se carga negativamente.

El mundo del ARN: hacia la especialización. Transmisión de información vs. Metabolismo

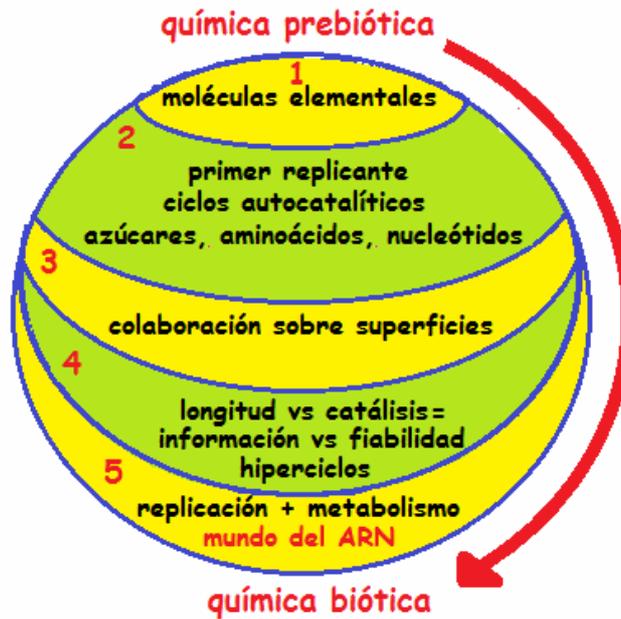
Vamos a hacer una pequeña parada para recopilar el camino avanzado hasta este momento desde la elemental química primigenia. Hemos hablado de moléculas con capacidad de replicación, con una cierta

habilidad de colaboración enzimática, con una posibilidad de potencial informativo y de transmisión de dicha información, que evolucionaría vía mutaciones y selección natural. Es decir, unas moléculas bastante versátiles y en el umbral de las moléculas de la Vida. Estamos ya muy cerca.

Amplíemos ahora el foco. La Vida, tal como la conocemos, es una compleja maquinaria en la que podemos observar *dos funciones esenciales*: la del software, con la información, su manejo y transmisión, y la del hardware, con toda la maquinaria del metabolismo fabricando los ladrillos y consiguiendo energía para que todo funcione y así mantener un determinado fenotipo viviente. En los seres vivos actuales la primera función está en manos de los ácidos nucleicos, ADN y ARN, mientras que la segunda está en manos de las proteínas y sus componentes, los aminoácidos, con sus capacidades enzimáticas.

La duda que se nos plantea desde el escenario de la incipiente química biótica es si primero aparecieron los ácidos nucleicos, o primero las proteínas, o bien coevolucionaron a la par. La verdad es que no lo sabemos, aunque la mayoría de las opiniones más serias y contrastadas están por el hecho de que los ácidos nucleicos fueron los primeros, opiniones que se ven soportadas por lo que conocemos acerca de los que forman nuestros paquetes genéticos actuales. El ADN o el ARN dominan las características imprescindibles que definen a la Vida: Información y replicación. A partir de ahí todo lo demás.

Nos encontramos así con un entorno dominado por los ácidos nucleicos que nos explicaría la esencia de la complejidad en las bases de la Vida. La teoría más aceptada en la actualidad es la del **mundo del ARN** que dice que la complejidad *metabolizar y replicarse*, se basa en un precursor común de todas las formas de Vida, que sería el ARN o bien una molécula anterior menos desarrollada, el pre-ARN. La apuesta por este tipo de moléculas se basa en que sus descendientes actuales son capaces de gestionar varias funciones esenciales: hacen copias de sí mismas, son la base de datos del funcionamiento genético y metabólico, catalizadoras de reacciones metabólicas -al igual que las enzimas- y mensajeras de información, habilidades que al surgir dentro de un mundo evolutivo podemos asegurar que se debían encontrar, aunque de forma somera, en moléculas ancestrales. El dominio inicial de algo semejante a estas funciones les habría dado en el mundo protobiótico unas ventajas competitivas y evolutivas frente a otras formas de experiencias de vida.



Posible camino desde la química prebiótica al mundo de la especialización biótica (esquema de elaboración propia a partir de diversas teorías)

La fuerza de la presión del medio ambiente, la misma que había hecho aparecer el ARN, impuso una nueva versión de ácido nucleico que era mucho más estable por su estructura doble helicoidal, el ADN, especializado en la información y la replicación, mientras que a las proteínas las seleccionó como las moléculas catalizadoras perfectas. El ARN tuvo que ceder la cartera de funciones a estos alumnos aventajados.



Esquema del posible proceso de paso del mundo del ARN al mundo del ADN, con cesión de la función de catálisis a las proteínas por parte del primero. (A partir de información del libro “Orígenes: El universo, la vida, los humanos”)

No puedo por menos que repetir aquí lo dicho un poco más arriba a la vista de que la selección darwiniana parece actuar también a nivel de moléculas: “... *permite imaginar que quizás leyes o usos que encontramos en la biología también funcionan en las moléculas simples dentro del mundo de la química*”. La más simple química y la más sofisticada y compleja biología se manifiestan como una misma entidad.

Estación Término: el invento funcionó, la bioquímica compleja era ya una realidad.

En estos momentos la pregunta es:

Y ahora, ¿cómo continúa la historia?

Hasta aquí hemos desarrollado un posible camino que pudo iniciarse con el primer autorreplicante, al que poco después le dimos el nombre de *gen*. Como podemos deducir de la anterior historia, nuestro nivel de conocimiento es escaso y sólo nos ha permitido, hoy por hoy, el planteamiento de una serie de teorías e hipótesis que se esfuerzan en desenrollar el intrincado pasado de las primeras biomoléculas, *teorías e hipótesis que están condenadas a cohabitar*. Ninguna de ellas es concluyente y quizá el hombre nunca sepa lo que pasó, aunque quizá, como otras veces en el mundo de la ciencia, la solución pasará por una síntesis de las hipótesis manejadas.

Y sin embargo no podemos dejar de pensar que aquello que pasó se intuye escondido en las pistas que siguen los investigadores y científicos, en los detalles que apuntan todos una clara orientación.

Experimentos como los comentados de Stanley L. Miller y Harold Urey son como una ventana abierta: un mundo posible está al otro lado. Un mundo en donde se han sintetizado las moléculas orgánicas detectadas en el espacio interestelar, formadas posiblemente bajo la motorización de los rayos cósmicos. O un mundo no tan lejano, en nuestra Tierra, donde también han aparecido moléculas orgánicas, de forma aparentemente espontánea, en lugares con gradientes químicos o escalones de temperatura apreciables.

Y qué decir de los resultados de determinados ensayos de laboratorio, en donde en los matraces se han mezclado en disolución moléculas sencillas de ARN y los nucleótidos elementales que conforman su estructura molecular. Bastó el empujón de una enzima sintetasa para que empezaran a replicarse las moléculas de ARN de forma espontánea y veloz.

Y lo que parece más sorprendente. El investigador americano Gerald Joyce en 2005 consiguió sintetizar dos tipos de moléculas de ARN, con una gran efectividad (la muestra autoduplicaba su población cada hora) sin utilizar ninguna enzima: simplemente cada tipo de ARN era el catalizador del otro.

En desiertos californianos se han expuesto mezclas de aminoácidos, fosfatos de amonio y sales de magnesio a temperaturas comprendidas entre 65°C y 70°C, alternando con condiciones frías y húmedas, obteniéndose polipéptidos. Unos resultados similares se consiguieron trabajando con nucleótidos en vez de con aminoácidos.

El bioquímico Sydney W. Fox en 1965 sometió una mezcla de aminoácidos a temperaturas de 150°C, consiguiendo macromoléculas que se comportaban física y químicamente como proteínas.

¿Y qué decir del natural comportamiento del ADN, que al calentarse pierde su configuración enmarañada? En este estado se le adhieren proteínas de forma espontánea, siendo una imagen del inicio del proceso de replicación.

Tantas y tantas esperanzas en que al final nos encontraremos con un camino que fue sencillo, asombroso y maravillosamente simple.

Quizás traer a colación todos estos ensayos y estudios parece más un circunloquio de teoría y praxis química, pero su único objetivo ha sido el acercarnos y familiarizarnos con la idea de que las moléculas orgánicas e inorgánicas no nacen en un acto de magia inexplicable, sino que son consecuencia inevitable de las reglas universales de funcionamiento del Cosmos. Y estas reglas estaban ya vigentes, por supuesto, en la joven Tierra del Hadeico. En algún lugar, mientras la Tierra estaba en la dura batalla de formación, se debió dar a la vez concentración de componentes, energía y estabilidad como para que la máquina echara a andar. Es de lo que hablaremos en el próximo capítulo.

05. La casa natal de la Vida

Hasta ahora hemos deambulado por el gran escenario donde surgió el milagro de la Vida, nuestra querida Tierra. Hemos visto también que la química prebiótica fue haciéndose, de forma espontánea, cada vez más compleja, hasta generarse un nuevo mundo, el del ácido ribonucleico, el ARN. Al final del capítulo anterior prometimos adentrarnos en las teorías que intentan explicar el lugar donde todo sucedió. Como lo prometido es deuda, vamos a por ello.

¿Cuál fue el escenario de lo que fue una inevitable maravilla?

Dada la imposibilidad material de obtener una fotografía real, vía restos geológicos o fósiles, hay que buscar las hipótesis más coherentes y posibles. Se barajan diferentes posibilidades: la Vida pudo aparecer en las aguas superficiales y cálidas de los protoocéanos, en charcas o marismas, o en las profundidades de dichos protoocéanos, junto a surgencias termales submarinas, ayudada quizás por plantillas de arcillas -moldes para la replicación por su geometría repetitiva- que ejercerían además una función catalizadora, favoreciendo las polimerizaciones de las moléculas que se depositaban sobre ellas y proporcionando la energía necesaria para la reacción.

La tesis de la sopa primigenia en aguas someras presenta una serie de dudas. La principal es que, aun asumiendo la espontaneidad en la generación de las moléculas precursoras de los polímeros de la Vida, cosa que parece probada por múltiples experiencias en laboratorios, parece difícil que en unas aguas abiertas se produjera una concentración suficiente de estas moléculas como para que tuvieran la oportunidad de encontrarse con la suficiente asiduidad, interaccionar intensamente entre ellas y así crecer y evolucionar. Se ha argumentado que todo ello pudo pasar en zonas de aguas someras que, siguiendo los ciclos meteorológicos se inundaban para posteriormente secarse, favoreciendo así la concentración de las moléculas disueltas. Otra dificultad estribaba en el tipo de atmósfera existente. Ya hemos comentado que en los ensayos realizados por Stanley L. Miller y Harold Urey se había conseguido obtener biomoléculas al someter un ambiente reductor a la energía de descargas eléctricas. Una atmósfera reductora está compuesta básicamente de H_2 , NH_3 y CH_4 . Sin

embargo en un momento de muy alta incidencia de las radiaciones ultravioletas estas moléculas no serían muy estables, ya que pasarían fácilmente a N_2 y a CO_2 . No hay evidencias de que la atmósfera de la Tierra fuera reductora en aquella época y sí de lo contrario al final del eón. Entre medias... todo fue posible. No obstante, los datos parecen indicar que la Vida empezó en una época muy temprana, y por tanto bien pudiera ser que apareciera en condiciones de una atmósfera reductora, cuando la disociación de sus moléculas aún no hubiera alcanzado un grado muy elevado. De todas formas, a esta temprana Protovida de la superficie del planeta le quedaba aún superar otro terrible inconveniente: el continuo bombardeo de meteoritos y cometas que caían sobre la superficie de la Tierra.

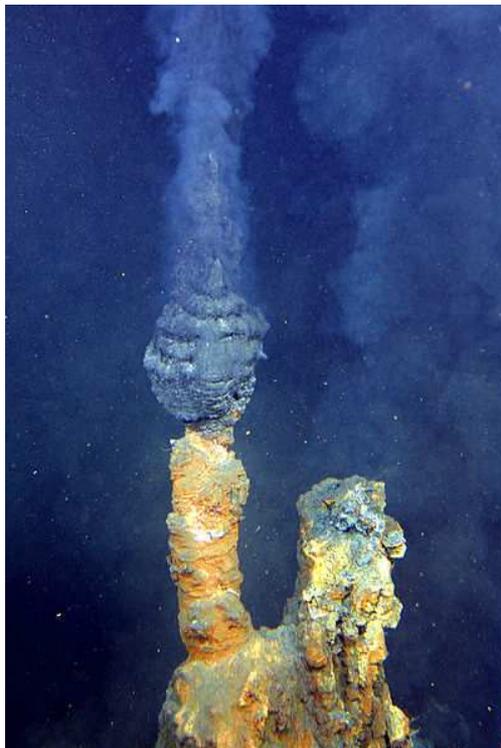


El Grand Prismatic Spring del Parque Nacional Yellowstone. Se supone que el ambiente de este lago con elevadas temperaturas y ambiente reductor sería similar al ambiente primigenio de los mares de la Tierra (Wikimedia, dominio público)

Hay alternativas a esta acta fundacional sobre la superficie de las aguas del planeta, también postulando mundos reductores, y que defienden que la Vida apareció en chimeneas hidrotermales submarinas, inicialmente catalizada por minerales. Se comenzó con las ideas de Günter Wächtershäuser, ya comentadas en un capítulo anterior, sobre el mundo del hierro y azufre, teoría que tomó gran solidez al ser descubiertas en el fondo oceánico este tipo de formaciones a lo largo del último cuarto del siglo XX. La teoría fue consolidada y perfeccionada más tarde, en 2002, por William Martin, de la Universidad de Dusseldorf, y Michael Russell,

geoquímico del Jet Propulsion Laboratory de la NASA en Pasadena, California.

Hay dos tipos de chimeneas submarinas. Unas básicamente de tipo volcánico en las proximidades de las dorsales oceánicas (zonas en donde las placas tectónicas se separan, de lo que hablaremos en otros capítulos) bautizadas como **fumarolas negras**, y otras que son consecuencia de la desintegración que provoca el agua en las rocas de la placa oceánica, de forma continua y progresiva, y que se las conoce por el nombre de **venteos hidrotermales alcalinos**. El proceso en ambos modelos se inicia cuando el agua en el fondo de los océanos permea el suelo y llega a zonas de magma o próximas a él, donde se sobrecalienta y vuelve a brotar como una especie de geiser submarino, en el caso de las fumarolas, o un incesante y suave borboteo, en de los venteos. No obstante, la química de ambos tipos de chimenea es distinta.



*Fumarola negra con estructura de sulfuro de hierro y sulfato de calcio
(Wikimedia, dominio público)*

Las *fumarolas negras* aparecen como estructuras en forma de chimenea que emiten nubes de material de color negro, arrastrando partículas con un alto contenido de minerales de azufre, como la pirita (sulfuro de hierro), CO_2 e iones metálicos, a unas temperaturas próximas a los 400°C y con **un alto grado de acidez**. Cuando se encuentran con las frías aguas del

océano, muchos minerales precipitan, especialmente en forma de sulfatos de calcio -anhidrita- recubiertos por precipitaciones de sulfuro de hierro, formando la chimenea alrededor de la surgencia, con una estructura muy compartimentada y porosa. Estas chimeneas tienen crecimientos muy rápidos, alcanzando en poco tiempo grandes alturas, lo que les confiere una gran inestabilidad.



Venteo alcalino con estructura de carbonato cálcico (Wikimedia, dominio público)

Los *venteos hidrotermales alcalinos*, como los del campo conocido como Lost City en el océano Atlántico, son distintos. Se producen alejados de las dorsales oceánicas y presentan unas temperaturas más modestas, en el entorno de 40°C a 90°C. El agua del mar que se infiltra por las fisuras de la corteza oceánica constituida básicamente por peridotita, una roca ígnea, se calienta y reacciona con el abundante mineral de hierro y magnesio que allí se encuentra, produciendo **un entorno de alta alcalinidad**, es decir con pocos protones H^+ , y flujos ricos en metano CH_4 e hidrógeno H_2 , y con concentraciones de minerales de calcio, bario o silicio que le dan su característico color blanco. Al contrario que en las fumarolas negras, en este tipo de venteos no se producen cantidades significativas de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno o iones metálicos. Al mezclarse la surgencia con el agua del mar, que se encuentra a unos 2°C y con CO_2 disuelto, sus iones precipitan, produciéndose carbonato cálcico y formando así unas chimeneas de hasta 60 metros de alto con una gran estabilidad. La estructura de estas chimeneas presenta unas formas porosas llenas de microcavidades.

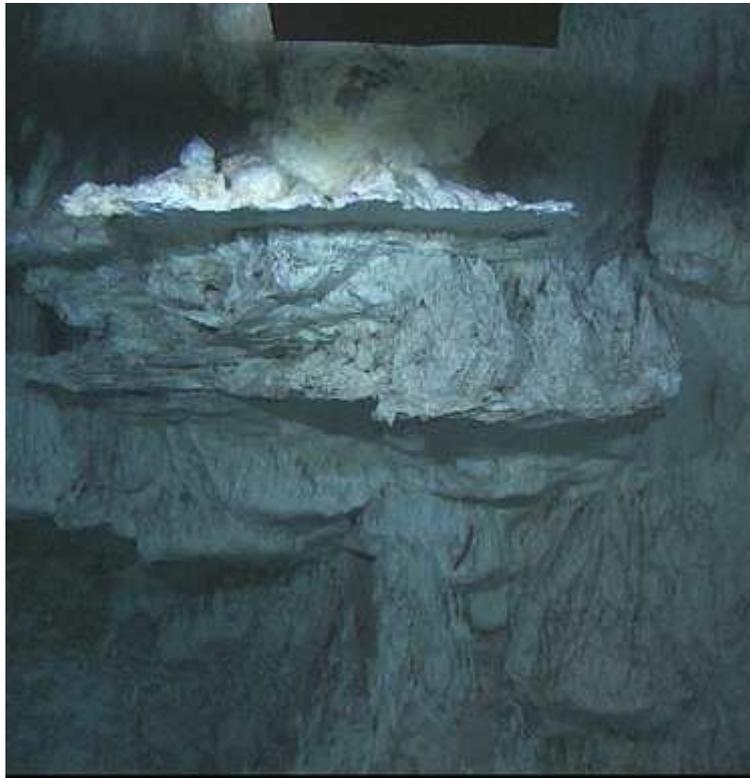
En ambos tipos de fumarolas se ha observado la presencia de numerosas especies de extremófilos y otros tipos de organismos viviendo en sus proximidades. Son de reseñar las poblaciones de bacterias quimioautótrofas que basan su metabolismo en los compuestos del azufre. Más tarde, en otros capítulos, veremos la importancia de este tipo de bacterias en la evolución de los seres unicelulares.

Ahora bien, hace 4 mil millones de años, cuando suponemos el inicio de la Vida, las condiciones del mar eran distintas. Las aguas serían muy ricas en hierro en su forma no oxidada de ión ferroso Fe^{2+} , ya que entonces el oxígeno era aún escaso, mientras que el fluido exhalado por las surgencias submarinas debía contener bastante ión hidrosulfuro HS^- . Estos dos iones se combinarían produciendo piritita FeS_2 liberando mucho H^+ que a su vez reaccionaría con el anhídrido carbónico disuelto en el agua produciendo biomoléculas. Conociendo estas circunstancias se ha intentado reproducir en el laboratorio lo que pudo pasar en la superficie de los fondos marinos durante el Hadeico, en un momento en que imaginamos que los venteos debieron ser muy abundantes. Efectivamente esto debió ser así, ya que en los ensayos, al inyectarse una solución de SNa_2 , parecido al fluido hidrotermal, en disoluciones de Cl_2Fe , que simula bien las condiciones del hierro en el mar de aquel entonces, se observó que precipitaban unas estructuras de SFe porosas, material semejante al de las chimeneas hidrotermales.

No parece por tanto una entelequia el suponer que durante el eón Hadeico en los fondos oceánicos, sobre la corteza de la litosfera submarina, se dieran este tipo de fenómenos y estructuras: las leyes de la química y de la termodinámica han sido siempre las mismas, tanto hoy como hace millones de años.

Así que imaginemos un primitivo venteo alcalino, posiblemente con más diferencia de temperatura con el agua que le rodeaba, quizás presentando alguna de las características químicas de las fumarolas negras: el magma estaba demasiado próximo y demasiado caliente, lo cual favorecería su proliferación. En estos venteos, o lo que fuera, energizados por los motores que suponen los gradientes químicos y térmicos que allí se producían, se encontrarían variadas moléculas e iones que se irían haciendo cada vez más complejos. De la corteza ascendían arrastrados por el caliente flujo de agua, una química alcalina, sencillas moléculas de hidrógeno y de CH_4 , compuestos de azufre y nitrógeno en forma de amoníaco, además de otras moléculas e iones, todas ellas necesarias para formar los ladrillos de la materia orgánica y para iniciar el proceso de obtención de la

imprescindible energía vital. Por otro lado, el mar era menos caliente y ácido, debido esto último a la gran concentración del CO_2 disuelto en aquellos momentos como resultado de la abundancia de este gas en la atmósfera hadeica y de la alta presión atmosférica a nivel de mar. A pesar de la baja concentración de oxígeno en el mar, los silicatos de hierro ferroso se iban oxidando lentamente a hierro férrico, liberando iones de H^+ . Abundaban también los iones de níquel y de compuestos fosfatados. Las diferencias de pH -alcalino en la surgencia, ácido en el mar-, de temperaturas -caliente en la surgencia y fría en las aguas libres- y de concentraciones iónicas entre el flujo del venteo y las aguas del fondo oceánico, se constituyeron en dinámicos impulsores químicos de lo que pasaba en la zona de mezcla.



Formación calcárea de Lost City. En las porosidades de este tipo de paredes pudieron darse las condiciones necesarias para iniciarse la Vida (Wikimedia, dominio público)

Un micromundo en donde abundaban el dióxido de carbono, hidrógeno, fósforo, nitrógeno... *todos los materiales para construir moléculas orgánicas*. Iones de níquel y hierro que reaccionaban con el sulfhídrico de las emanaciones formando moléculas de SFe y SNi , con un tremendo *potencial energético* basado en su fuerte capacidad redox, con la que impulsarían las cadenas de electrones que creaban la energía necesaria para

tan complicada fábrica. Un campo de protones que empujaban en la misma dirección (entenderemos mejor estos procesos tras la lectura de un capítulo posterior). Un *universo de materiales y energía*.

Faltaba sólo el cobijo en donde estos dos actores principales de la alquimia se concentraran, preservaran y colaboraran.

Las porosidades de las estructuras calizas de las chimeneas eran el alojamiento ideal para el proceso, mientras que su recubrimiento por sulfuros metálicos suministraba una continua fuente de electrones energéticos para la química prebiótica, lo que, unido a su potencial catalizador, formaba un escenario ideal para las polimerizaciones. Básicamente los mismos catalizadores, hierro de muy distintas clases, níquel y sulfuros de molibdeno que utilizan actualmente las células para acelerar la captura y conversión del CO₂ en moléculas orgánicas.

Sabemos que desde una edad temprana se dieron las circunstancias que pudieron hacer posible la aparición de una “protovida” química aún no biológica. Aquellos activos autorreplicantes a los que gustaba colaborar en el medio donde se encontraban. Ahora y aquí, en este momento de la biografía de la Vida, junto a las chimeneas hidrotermales submarinas del Hadeico, hemos dado un paso más y nos encontramos casi en el mundo del ARN.

Ya sabemos que el mundo de los precursores del ARN es la imagen más probable de lo que surgió en estos escenarios. Pequeñas moléculas del tipo ARN que interaccionaban entre ellas, acoplándose de acuerdo con las leyes termodinámicas y químicas en el interior de los minúsculos recovecos del cuerpo de las chimeneas de los venteos. Unos entes que se autoconstruían y se duplicaban, primero por la acción catalizadora del vecino, más tarde por su propia autocatálisis, y que encontraban en el interior de las porosidades una química que les dotaba de materiales de repuesto y energía para su replicación. Los precursores del mundo del ARN dentro de las porosidades se irían haciendo también más complejos.

Algunos de estos precursores actuarían ya como enzimas “ayudando” a otros a replicarse o a unirse formando unas cadenas más largas. Se producirían hiperciclos de colaboración. La selección natural haría el resto al dejar paso sólo al más competitivo y eficaz, y eliminar el resto. Las protocélulas generarían así su material informativo, su ARN preferido. Y como el ARN de un retrovirus, el campeón se expandiría a otros poros de la roca en los que también sería el campeón. Probablemente seguiría su

trabajo automático de configuración propia y del medio celular, por un lado evolucionando cada vez más a formas muy sofisticadamente enmadedadas, “herramientas 3D”, con las que podía favorecer encuentros moleculares consolidando una función enzimática. Y por otro lado hacia formas sencillamente estructuradas, ideales para una replicación con pocos errores, orientándose hacia una molécula cada vez más parecida al ADN. Así, hasta que inventó una “fórmula proteína” que catalizaba mejor que él y un ácido nucleico que replicaba mejor que él, el ADN. Y tuvo que cederles la antorcha.

Es sorprendente como en el mundo de los virus se observan tipologías que parecen el reflejo de lo que pudo pasar. Los más complejos poseen un genoma de ADN pero los más sencillos, que pueden ser supervivientes de la época del mundo del ARN, lo tienen de este ácido nucleico con muy pocos nucleótidos. Desde los *tiroides* que son incapaces de codificar la proteína que precisan para su autorreplicación, pasando por los un poco más complejos *Deltavirus* en donde conviven un gen y una proteína enzimática que no es la que precisa para replicarse, hasta llegar a los *Narnavirus* en los que la proteína acompañante de su gen es producida por él mismo y es precisamente la que cataliza su propia replicación. Es decir, desde un trozo de ARN que necesita que alguien le ayude en su replicación, pasando por ARN's que conjugan un gen y una enzima, primero independientes y después perfectamente ligados en sus funciones.



Bacterias fototróficas que viven cerca de una fumarola negra frente a las costas de México a una profundidad de 2.500 metros (Wikimedia, dominio público)

En esta aventura, el ARN obtendría la energía de una forma similar a como la obtienen las bacterias que actualmente viven en las fumarolas y venteos submarinos: a partir de los gradientes de protones y de la energía de enlace de los compuestos de azufre ayudados por el poder oxidante de los abundantes iones metálicos. Y la almacenarían para su actividad apoyándose en una molécula, el acetiltioéster, abundante de forma natural en el mundo hidrotermal submarino, que se produce fácilmente mediante el ataque de radicales libres de hierro y azufre sobre el dióxido de carbono. Esta molécula hace funciones semejantes a las del adenosín trifosfato, ATP, las pilas de energía de prácticamente todas las células vivas.

Todo nos lleva a imaginar un resumen poco menos que sorprendente: *el ancestro común más antiguo de los seres vivos no fue una célula, sino unas rocas producidas en una fumarola alcalina*, con paredes catalíticas compuestas de hierro, níquel y azufre, y energizadas por un gradiente natural de protones resultante de la oxidación de los minerales sulfurosos. En sus solitarias y recónditas porosidades se gestaron complejas moléculas que ya jugaban con los *atributos* que hoy tienen los seres más simples, las bacterias quimioautótrofas, organizando el código genético, montando el ribosoma que es la fábrica celular de proteínas, seleccionando al ADN, desarrollando un núcleo elemental de metabolismo suficiente como para suministrar los componentes que necesitaría para su replicación, aprovechando la energética química redox y mediando como enzimas catalizadoras de ATP, todo ello en un entorno individual y aislado.

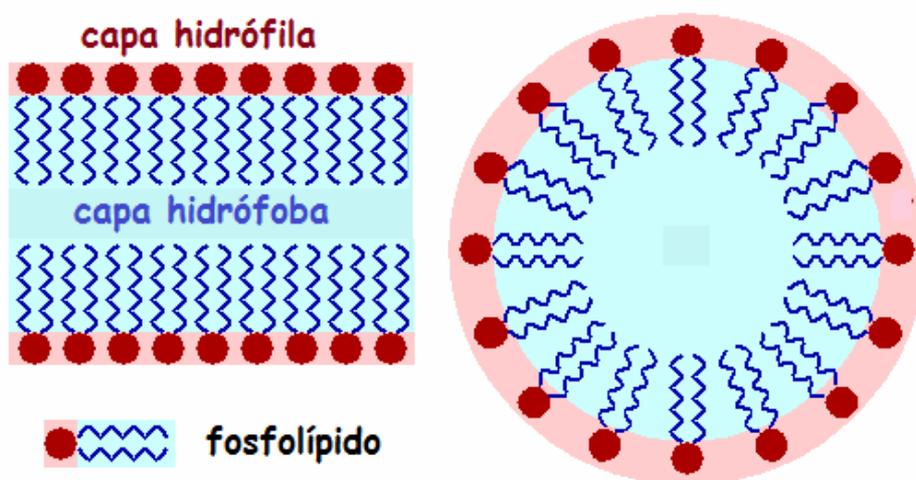
Este ser casi mineral que se encontraba en la frontera de la Vida estaba presenciando el albor de la revolución bioquímica, cuando los genes y las proteínas se diversificaban llevando a cabo millares de nuevas y diferentes funciones, cuando el ARN y los sulfuros de hierro fueron sustituidos como catalizadores principales por las proteínas y cuando la química biológica empezó a diversificarse y tomar cuerpo.

Ahora sólo le faltaba volar independiente y lejos de la estructura mineral de los venteos. Necesitaba algo parecido a un traje espacial que reprodujera su ambiente protector natal, un traje lo suficiente maleable como para que su química se pudiera enriquecer en el nuevo medio marino donde iban a ser pioneros, haciendo posible que entes hijos heredaran su autonomía e independencia. Para ello necesitamos dar un nuevo paso en esta historia, subir un escalón más apoyándonos en las membranas lipídicas.

Aclaremos en que consisten estas membranas.

Sólo hay que acudir a la naturaleza, o simplemente lavarse las manos, para ver cómo aparecen de forma espontánea burbujas, micelas, de una finísima capa que encierra aire. Se ha observado en el laboratorio que en disoluciones de fosfolípidos se generan este tipo de micelas y membranas, que van creciendo por adición de más y más fosfolípidos libres, y que se dividen de forma espontánea dando micelas hijas capaces de continuar el mismo proceso. Algo con lo que ya se encontró Oparin al estudiar sus coacervados, tal como se comentó en el capítulo segundo.

Los fosfolípidos son moléculas muy largas, que en un extremo tienen un grupo fosfato normalmente con una carga negativa, siendo el otro extremo completamente apolar -sin manifestación de carga eléctrica-. Por otra parte tenemos a la molécula de agua que tiene un carácter bipolar, ya que al tener el núcleo de su oxígeno mayor cantidad de protones con carga eléctrica positiva -ocho- en relación a los que tiene el hidrógeno -uno-, se produce una desviación hacia el primero de la población de electrones negativos de la molécula. La consecuencia es que la molécula de agua presenta una carga negativa cerca del oxígeno y una positiva cerca de los hidrógenos. Mezclamos agua y lípidos y ¿qué pasa? Que los polos de cargas opuestas se juntan, mientras que los extremos no polares huyen del agua y se refugian entre ellos. Resultado: una membrana formada por una doble capa de lípidos con sus extremos polares hacia fuera. Cuando estas membranas lipídicas se doblan aproximando sus extremos, se unen formando una burbuja. Esto sucede de forma espontánea ya que esta estructura equivale al estado de mínima energía para los agregados de estas moléculas.



Una bicapa lipídica (izquierda) y una micela (derecha) (a partir de Wikimedia, GNU FDL)

Las primeras membranas celulares tuvieron que provenir de esta circunstancia física al configurarse una micela que encerraría a una disolución de muchas y variadas moléculas, formando así un perfecto foro de encuentro entre ellas. De hecho las membranas de las células y de sus núcleos tienen esta constitución molecular. Que además de su estanqueidad para el desarrollo de la vida presentan otra ventaja, ya que son parcialmente permeables según el tamaño de las moléculas: permiten el paso a los monómeros con los que se construyen los ácidos nucleicos y las proteínas, y a la vez la salida de los productos de desecho del metabolismo.

Pero en la situación de inicios de la bioquímica la creación de largos fosfolípidos era muy compleja, debido precisamente a su longitud. El proceso, por tanto, debió de ser lento, como sucedió con tantos otros que hemos analizado hasta ahora: la evolución habitualmente es así, un rosario de pequeños escalones. Todo comenzaría con un pequeño lípido, quizás producto residual de algún ciclo autocatalítico, que se quedó pegado sobre la superficie que contenía a una disolución repleta de solutos. Este lípido adosado a la superficie influyó sobre su ambiente ya que al rechazar al agua en su entorno por su carácter hidrofóbico crearía algo así como una burbuja de moléculas “vacía” de agua que iba abriendo camino a otros lípidos, los cuales crecían al interrelacionarse entre ellos. En principio formarían como una pequeña mancha de aceite en el agua, pegada a la pared de pirita dentro de un pequeño poro de la roca. Con el tiempo esta mancha, ya cohesionada como una membrana, se abombaría dejando un espacio de “agua en aceite” entre ella y la roca, formando una burbuja, una especie de protocélula fija sobre el sustrato. A través de la membrana pasarían moléculas muy simples como el CO_2 , quedando en su interior algunos ciclos autocatalíticos autótrofos -quizás unas sencillas cadenas de ARN autorreplicantes- con su metabolismo incipiente, siendo la superficie pirítica la suministradora de iones y energía.

Con ello se consiguió un entorno aislado en donde se desarrollaba la bioquímica de la forma necesaria como para que aumentara la entropía del conjunto, permitiendo el que se incrementara el orden, a costa de disminuir la del exterior gracias a una energía que entraba al sistema a través de la membrana fosfolípida. La base del delicado equilibrio dinámico de la homeostasis vital.

Poco a poco el abrigo de las porosidades se fue haciendo innecesario al desarrollarse las primitivas vesículas fosfolípicas. En algún momento de la diversificación de la bioquímica se traspasó a estas membranas las funciones de bombeo de protones y las funciones redox que hasta entonces

venía desarrollando el sulfuro de hierro de las paredes de roca que las albergaba. La membrana debía ser ya prácticamente procariota, al menos en su estructura, y seguramente fue en este momento en que se desarrollaron dos diseños, a la vista de las distintas bioquímicas alcanzadas en las membranas de las eubacterias y de las arqueobacterias, los seres vivos más ancestrales. Quizás en estos mismos instantes, coevolucionando a la par de las membranas orgánicas, se estaría pasando del mundo del ARN replicante y enzimático, al mundo cooperante de ADN-ARN-proteínas, cada uno con su función. También a la par que iba sucediendo lo anterior, los incipientes genomas circulares de ADN se irían complicando por duplicaciones o transmisiones horizontales entre diversas “células”, en un camino evolutivo de mayor eficacia en su codificación de información y en su replicación con escasos errores.

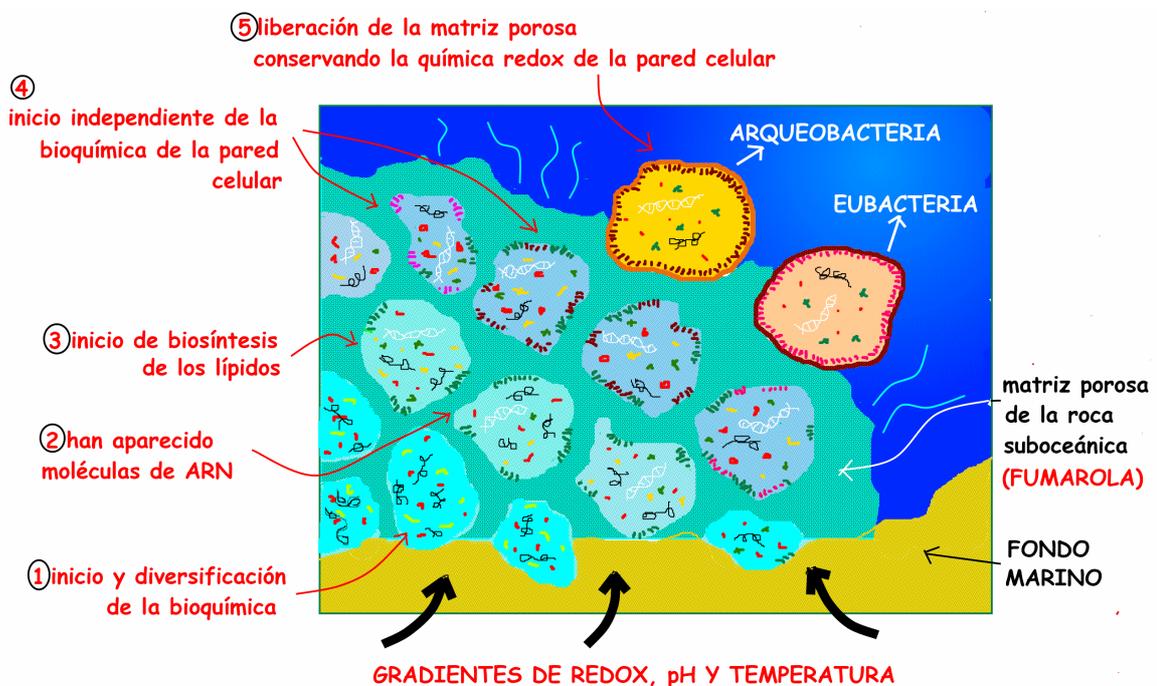


Diagrama de la teoría de Martin y Rusell: desde la primera química de la vida confinada en los poros de los venteos submarinos hasta la aparición de células libres.

Con los procesos químicos vitales ya automantenidos, un ser vivo independiente pudo liberarse de su cárcel pétreo y salir a las aguas libres a practicar su quimioautotrofismo. Sobre el fondo marino afincaron su vida aprovechando el CO_2 disuelto y la energía química de los compuestos de sus lechos. A medida que iban muriendo, sobre el fondo marino se comenzaba a sedimentar materia orgánica que sería mucho más tarde utilizada por las grandes células heterótrofas que tardarían aún mucho en

llegar. Lo anterior constituye la revolucionaria teoría de los ya mencionados profesores William Martin y doctor Michael Russell.

Sea o no sea cierta la hipótesis anterior, alguien tuvo que ser el primero. Según el genetista Andrés Moya, tal como dice en su libro “*Simbiosis*“, parece ser que teóricamente con 208 genes una célula tiene lo mínimo para replicarse y metabolizar. Y hay serias evidencias de que todos los seres vivientes que somos y han sido tenemos un ancestro común que ya introdujimos en un capítulo anterior, el **LUCA** -*Last Universal Common Ancestor*, Último Antepasado Común Universal- que contaba con 600 genes. Hay diversas teorías al respecto, aunque la más extendida es la que dice que la Vida apareció una sola vez sobre la Tierra, pero nadie puede asegurar que no se hubieran dado otros brotes hoy perdidos en el camino, desaparecidos al verse incapaces de resistir la presión evolutiva o que permanecen escondidos en lugares no explorados del planeta. Éstas son las evidencias que nos permiten asegurar la existencia del antecesor común. Podemos suponerlo cuando observamos que los procesos metabólicos más comunes están extendidos en todos los seres vivos. Lo deducimos a partir de la sorprendente y ancestral coincidencia de que los mismos genes expresan las mismas proteínas en toda la comunidad histórica de organismos vivos. Que así nos lo indica el constatar la existencia de un atávico y único código genético a nivel planetario. Y está demostrado largamente a partir de los estudios realizados sobre la evolución de genes que nos permiten husmear en su árbol genealógico. Hemos podido retrotraernos con absoluta seguridad hasta el LUCA mediante análisis genéticos con los que se siguen la pista a unos cien genes (lo que suponemos significa el 6% de la cesta de protogenes de tan venerable abuelo) existentes en el acervo actual de la biosfera.

A partir de ahí siguen aún abiertas muchas preguntas: ¿cómo se las apañó la primera protobacteria cuando abandonó la primera chimenea calcárea?, ¿cómo llegó a colonizar otras chimeneas u otros ambientes?, ¿cómo fue evolucionando el metabolismo que le permitió esta hazaña?

La lectura de este capítulo no nos está dando certezas absolutas, y seguiremos manteniendo los interrogantes. Efectivamente, todo son hipótesis y no se sabe con certeza cómo y cuándo apareció la Vida, aunque las pistas son esclarecedoras y, para el que precise certezas, podríamos decir que también son esperanzadoras. Parece casi una evidencia que el proceso fue ineludible, ya que los resultados de los ensayos teóricos parecen confirmar la casi espontaneidad de todos los procesos necesarios, también corroborado por las evidencias geológicas y bioquímicas que nos

llevan a pensar que se produjo en un momento muy inicial de la vida de la Tierra, posiblemente más allá de hace 3.800 millones de años. Y si efectivamente tenemos un ancestro común, todo parece indicar que hay que apostar por la mayor probabilidad de unos hechos encadenados por la evolución y la selección natural, una cadena de sucesos que sin necesidad de magias hicieron posible que la Vida se extendiera por doquier.



*Representación artística de la Tierra saliendo del eón Hadeico
(composición propia a partir de NASA, dominio público)*

Y hasta aquí la historia hadeica. En aquel momento final de época, vibrando aún con los últimos rumores del Bombardeo Tardío, nos hubiera asombrado el juego de los astros. El Sol, menos brillante que hoy en día, atravesaría rápidamente el arco del cielo, quizás al doble de velocidad que ahora, mientras que la Luna muy próxima aparecería cada noche atterradoramente grande sobre nuestras cabezas. La Tierra era una bola brillante, un globo de agua, festoneada por unas placas áridas cubiertas de pústulas volcánicas. El viento y el agua degradaban estos inicios de continentes depositando el resultado en el fondo del mar, en donde crecían capas de sedimentos de gran espesor. Nada de color verde sobre las escasas tierras estables, ningún movimiento a excepción de remolinos de polvo, las torrenceras desbordantes y el correr de las lavas. La atmósfera parecida a la actual, aunque sin oxígeno, se había ya aclarado: dominaban el dióxido de carbono, el metano, el nitrógeno y el agua. El cielo, posiblemente, dada la gran cantidad de vapor de agua en la atmósfera, era tan azul como el que

conocemos y los amaneceres y atardeceres no serían tan rosados o rojos al no estar la atmósfera tan contaminada por el polvo, aunque seguramente todo sería menos luminoso porque así lo era el Sol de entonces. El mar templado y ácido ocupaba la cubeta que formaba la placa oceánica, sujetándose sobre un magma muy caliente que de vez en cuando hacía valer su poder agrietando este fondo marino. La Vida primigenia bullía en el agua, tan sólo en el agua. Primitiva y abundante. Esperando el siguiente eón para agarrarse a cualquier oportunidad y conquistar cualquier nuevo recoveco.

Y así lo veremos a partir del siguiente capítulo en donde daremos los primeros pasos por el eón Arcaico.

06. Entramos en el eón Arcaico

Por fin llegamos a un nuevo eón, el Arcaico, con la Vida ya organizada tal como lo estuvimos presenciando en los capítulos anteriores. A partir de ahora vamos a empezar a movernos con organismos perfectamente estructurados, las bacterias, y sus manuales de funcionamiento. En este capítulo haremos una introducción general sobre estos seres vivos elementales, los primeros, y hablaremos acerca del escenario por donde se movían hace la friolera de entre 3.800 y 2.500 millones de años... es decir, a lo largo del eón Arcaico.

El nombre Arcaico proviene del griego antiguo “Αρχη”, que significa “*comienzo, origen*”. También a este eón se le conoce por el nombre de Arqueozoico, es decir “*comienzo de la vida*” (zoicos, vida en griego). Abarca el 29% de la edad de la Tierra y es un periodo lleno de acontecimientos: recoge el testigo del Hadeico y lo consolida, dejando el escenario con todos los elementos para la representación teatral que hoy conocemos. En él se asienta la riqueza de las vías metabólicas, y por tanto dedicaremos una explicación teórica sobre ello.

Al comenzar el periodo, la Tierra aún estaba saliendo del episodio del bombardeo tardío, iluminada por un sol pálido, con una dinámica tremenda en la que juegan mares de agua, episodios magmáticos y pequeñas cortezas solidificadas. La vida, casi con toda seguridad, había empezado a experimentar en aguas someras o en venteos hidrotermales submarinos. De cualquier forma, se tratarían de bacterias primitivas.

Al finalizar el Arcaico la Tierra se habrá convertido en un cuerpo estable con grandes continentes surgiendo de un mar tibio, colonizado desde hacía más de mil millones de años por bacterias fotosintéticas que prepararon el siguiente salto evolutivo de la Vida.

No son muchas las rocas que se conservan de este eón, de gran actividad geológica, que han tenido que sufrir hasta hoy más de 2.500 millones de años de ciclos de erosión y sedimentación, presión y subducción, fusión y vulcanismo, solidificación y plegamiento. Y vuelta a empezar. En realidad, sólo el 0,5% de las tierras de hoy en día corresponden a aquella época.



Distribución actual de rocas procedentes del Arcaico

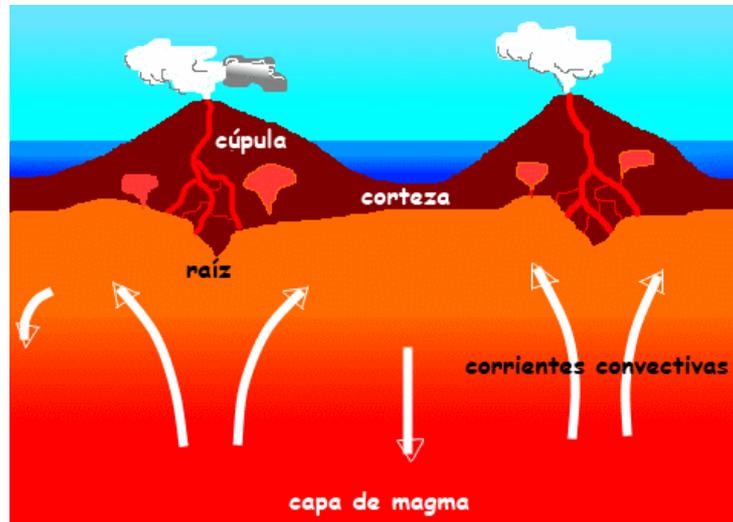
El motor de este tejer y destejer son las tensiones energéticas que en cada momento tiene el conjunto del planeta, su magma y su corteza. A comienzos del Arcaico el flujo de calor de la Tierra era casi tres veces superior al que tiene hoy y el doble que a principios del siguiente eón, el Proterozoico (hace 2.500 millones de años). Se contaba, por tanto, en esta era con un buen motor para la formación y deformación de la litosfera.

Centrémonos en el manto magmático. En él se darían zonas con distintas temperaturas. En los puntos calientes del magma las fuertes corrientes convectivas ascendían con más energía y más materia, por lo que sería fácil que en algunas zonas más frías de la superficie se fuera acumulando suficiente cantidad de material como para formar un germen de corteza estable, que progresivamente se iría enfriando con relación a su entorno, favoreciendo su crecimiento que iría así modelando una isla de roca. En estos puntos se formarían grandes cúpulas de materia enraizadas en el manto fundido.

El resto de las corrientes convectivas magmáticas, las que no se habían solidificado, serían desviadas por estas raíces concentrándose en puntos calientes que no permitían su desarrollo y que dieron como resultado una placa litosférica local de menor espesor. Posiblemente este fenómeno magmático se dio en zonas que correspondían a los fondos oceánicos.

La teoría cúpula-raíz parece tener evidencias. La alta temperatura de la Tierra en aquellos momentos, con un magma profundo muy caliente y fundido, puede hacer pensar que el límite “magma fundido-litosfera” debía ser muy poco profundo a lo largo de toda la superficie del planeta. Sin

embargo se han encontrado materiales -diamantes- que sólo se pudieron generar a temperaturas que se daban a unos 150-200 kilómetros de la superficie. Eso indica que en algún punto la litosfera penetraba al menos hasta esta profundidad, como una especie de raíz inserta en el magma.



Explicación verticalista del origen de la corteza arcaica

Dentro de este esquema se supone que debía haber una gran actividad tectónica, dados los altos flujos energéticos del momento que imprimían una gran velocidad al proceso de generación de la litosfera. Cabría esperar que hubiese una mayor actividad en las *dorsales suboceánicas* (líneas de rotura de los fondos oceánicos) y además un mayor número de ellas, así como también un mayor dinamismo en las *zonas de subducción* (zonas en donde la litosfera oceánica deslizaba bajo la continental).

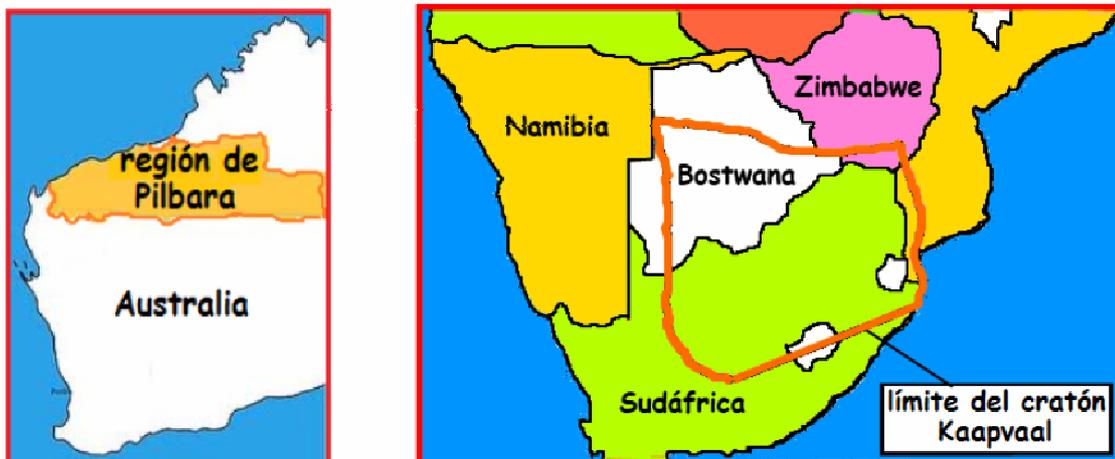
Esta dinámica impediría que los cratones tuvieran tiempo de crecer hasta un gran tamaño. Como consecuencia habría un mayor número de placas solidificadas y de tamaño no muy grande, con una gran movilidad y deformación, ya sea producida por las colisiones entre ellas como por las aportaciones de materiales volcánicos: la norma eran los pequeños y dinámicos protocontinentes.

Debido a ello las costas serían abruptas, sin zonas de aguas poco profundas, por lo que los residuos de la erosión de las microplacas quedarían depositados en la profundidad de las aguas, junto a ellas, generando unas capas sedimentarias de gran espesor, de hasta 30 kilómetros. Estos sedimentos metamorfozados lentamente por la presión constituyen la parte profunda de la actual litosfera. Entremezcladas con estos minerales se encuentran franjas compuestas por una gran variedad de

unidades rocosas no homogéneas y de formas extrañas, compuestas por silicatos de hierro o magnesio, llamadas “*cinturones de rocas verdes*”. En esta época nuestro conocido hierro bandeado, del que ya se habló en un capítulo anterior, seguía su formación.

El *hierro bandeado* es muy significativo desde el punto de vista de la biosfera. Durante el anterior eón el oxígeno básicamente se encontraba asociado en complejos moleculares, como el agua, el dióxido de carbono o los silicatos de la litosfera. Sin embargo las capas de óxido de hierro de esas formaciones rocosas, que alternan con capas de silicatos degradados, indican que ya había oxígeno molecular libre en proporciones apreciables. Y eso quiere decir que ya había bacterias con metabolismo fotosintético oxigénico, emitiendo O_2 como materia residual de su metabolismo. La opinión más generalizada es que las primeras bacterias que dispusieron de esta habilidad datan de hace 2.800 millones de años, aunque algún estudio⁽⁹⁾ basado en el estudio de hematitas -óxidos de hierro- parece adelantar la fecha hasta hace 3.460 millones de años.

A medida que la Tierra se iba enfriando, las microplacas se fueron estabilizando en un largo proceso continuo que duró hasta el final del Arcaico. En este momento, y por motivos desconocidos, a pesar de que los flujos energéticos se habían atemperado a la mitad desde el inicio del eón por el propio enfriamiento del planeta, se produjo un resurgimiento de la actividad magmática, de forma que al acabar el Arcaico se había formado ya, y en un corto intervalo de tiempo, el 50% del total de la corteza continental actual, y habían aparecido los primeros grandes continentes y las secuelas de la actividad geológica sobre ellos. Se iniciaba con ello la **dinámica de tectónica de placas**, según el concepto actual de la misma.

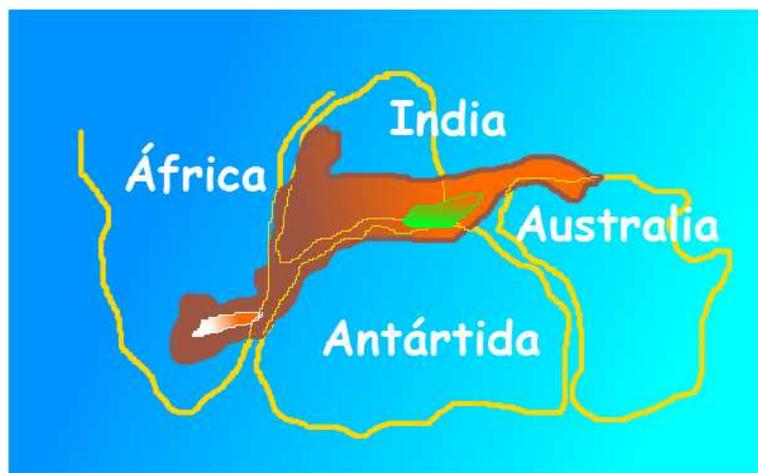


Localización de los pequeños cratones de Pilbara y Kaapvaal

Vaalbará es el nombre del primer e hipotético supercontinente que apareció sobre la Tierra, hace unos 3.500 millones de años. Su existencia se justifica en los estudios geocronológicos y paleomagnéticos de dos cratones arcaicos -aún no podían ser considerados propiamente como continentes-: Kaapvaal (denominado así por la provincia sudafricana de Kaapvaal) y Pilbara (de la región de Pilbara, en Australia Occidental).

Con posterioridad aparecerá **Ur**, hace 3.000 millones de años, del que se sabe muy poco excepto que sus restos se encuentran en la actual India, Madagascar y Australia. Posiblemente en su momento fue un único y solitario continente, a pesar de ser muy pequeño. Su nombre viene de la misma palabra alemana que quiere decir “original”.

Kenorland, o también llamado Ártica, fue ya un supercontinente, uno de los más tempranos sobre la Tierra. Se cree que se formó hace unos 2.700 millones de años al agruparse los primeros cratones del eón y la rápida formación de una nueva corteza continental. Abarcaba lo que mucho más tarde serían los continentes de Laurentia (el corazón de las actuales Norteamérica y Groenlandia), Báltica (los actuales países bálticos y Escandinavia), Australia occidental y el Kalahari.



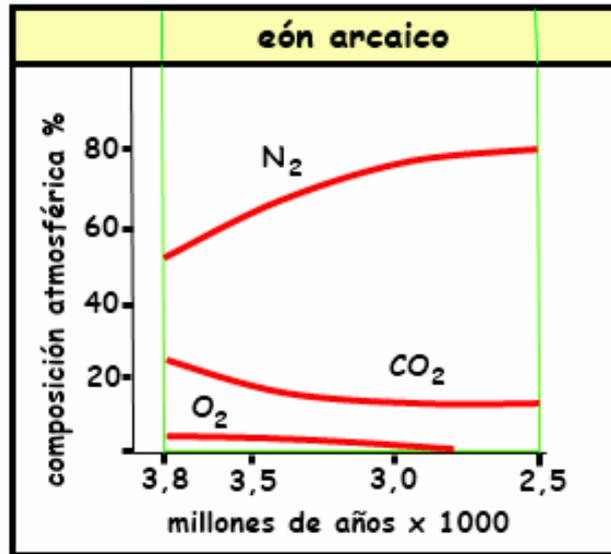
El pequeño cratón de Ur con indicación del perfil de los territorios actuales

Visto desde la perspectiva, parece como si en estos 1.300 millones de años que duró el Arcaico, la geología iba experimentando, tanteando despacio, pasando de un mundo poco definido y muy dinámico a un mundo más estable, base para lo que vendría después, en la era Proterozoica, que es cuando ya toman cuerpo los grandes cratones continentales.

Muy semejante fue lo que pasó en la biosfera: el Arcaico constituyó una época de invención y consolidación, a nivel muy elemental, que abría puertas para su posterior desarrollo durante el eón posterior. La temperatura de los océanos debía ayudar. La presencia de cristales de yeso y bacterias fijadoras de nitrógeno encontradas en las rocas arcaicas demuestran que las temperaturas debieron de oscilar en un intervalo comprendido entre los 30° a 40°C. En estas cálidas aguas proliferaban seres vivos sumamente simples con variadas estructuras, agrupados en los dos dominios que aún reconocemos, bacterias y arqueas, que desarrollaban un abanico muy amplio de soluciones metabólicas, obteniendo la energía necesaria a partir de formas variadas e insospechadas: nada fue imposible para ellas. Podemos considerar que la variedad del Arcaico sorprende más por su diversidad metabólica que por la morfológica.

Se cree que la atmósfera, que durante el eón Hadeico estuvo compuesta por el CO₂ primigenio y gases reducidos como el agua, amoníaco y metano, se había ido transformando poco a poco, de forma que hace 3.900 millones de años se tiene la certeza, dado el grado de oxidación de las rocas de aquella época, de que había cambiado por completo. El antiguo amoníaco había sido disociado por la radiación ultravioleta convirtiéndolo en nitrógeno molecular, N₂, mientras que el metano, CH₄, se iba transmutando en CO₂ según el proceso que comentamos en breve. En las emanaciones volcánicas abundaría el CO₂ y el agua.

A pesar de lo anterior, sorprendentemente la concentración del dióxido de carbono no creció, al contrario, iba perdiendo su presencia posiblemente por el efecto de varias circunstancias. La primera sería que al irse enfriando la tierra y los mares, su disolución en las aguas podía ser mayor. La segunda es que se supone que la fotosíntesis anoxigénica -de la que hablaremos en otra entrada-, gran demandante y consumidor de CO₂, era ya un invento operativo desde hace posiblemente 3.500 millones de años. Una tercera circunstancia se producía seguramente desde hacía mucho tiempo como consecuencia de la reacción del agua y el propio dióxido de carbono en la atmósfera, por la que se produciría una disolución de ácido carbónico, CO₂H₂, en las gotas de agua. Al llover, este medio ácido disolvería los silicatos de los cratones transformándolos en sales del tipo carbonato que fueron arrastradas hasta el mar, formando allí grandes capas sedimentarias en donde quedó secuestrando gran parte del CO₂ atmosférico. Bien pudo ser esto último lo que diferencia ahora mismo a la Tierra de su hermana Venus, con una atmósfera de CO₂ que genera un efecto invernadero de altas temperaturas que la hace inhabitable.



Evolución de algunos gases atmosféricos durante el Arcaico

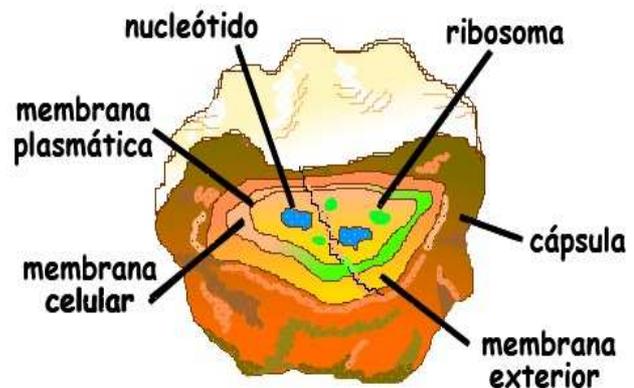
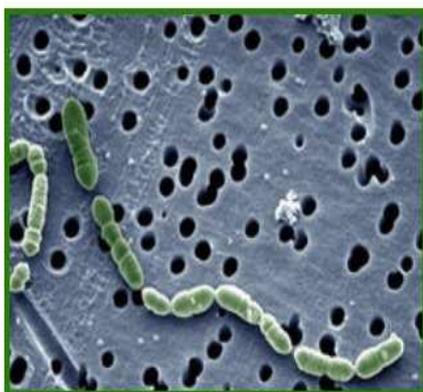
En aquellos momentos el agua de la superficie del mar se veía bombardeada por los abundantes rayos ultravioletas, lo que producía la rotura de su molécula. El ligero hidrógeno resultante se escaparía de la atracción gravitatoria hacia el espacio. El oxígeno producido en esta hidrólisis y el generado por las bacterias fotosintéticas pasó a la atmósfera, aumentando su presencia. A pesar de ello, en los primeros momentos del proceso no se apreció un incremento importante en la concentración de este gas, ya que era “secuestrado” a partir de procesos químicos naturales, como eran las ya comentadas oxidaciones del hierro -que en aquellos momentos era muy abundante en los silicatos en su forma de ión ferroso-, o a través de la fotólisis del metano que por acción de la radiación ultravioleta se iba transformaba en CO₂ y agua, o bien pasaría a formar una capa de ozono que protegería a los organismos vivos de los efectos perjudiciales de dichas radiaciones solares. Otra gran cantidad lo usarían las propias bacterias para su metabolismo y otra parte se disolvería en el agua del mar.

Poco a poco el oxígeno fue levantando cabeza a medida que se iban saturando los nichos en donde era atrapado, quedando oxidado todo lo susceptible de ser oxidado, de forma que hace 2.400 millones de años concluyó el proceso conocido como la **gran oxidación**, también denominado como crisis del oxígeno, un gran cambio medioambiental con el que se cierra el eón Arcaico. Tuvo que esperar unos 400 millones de años para que la participación del oxígeno en la composición de los gases atmosféricos se hiciera relativamente significativa.

La evolución de la composición de estos gases nos permite imaginar cómo serían las temperaturas. A principios del Arcaico, con grandes concentraciones de agua y metano, gases ambos de potente efecto invernadero, la temperatura sería cálida. Al disminuir la participación atmosférica de ambos gases, así como la del CO_2 , hay que suponer que a medida que avanzaba el Arcaico la temperatura se fuera enfriando, aunque a lo largo de todo este eón aún no hay evidencias de ninguna glaciación. Pero esto era algo que iba a caer por su propio peso: la primera época de hielos se produjo prácticamente en la frontera del Arcaico con el Proterozoico, la **glaciación Huroniana** entre 2.400 y 2.100 millones de años antes de hoy.

Dibujado el escenario de estos 1.300 millones de años podemos pasar a ver qué ocurrió en la biosfera, cómo se manejaron aquellas pequeñas células que habían escapado de los venteos hidrotermales submarinos. Recordemos cómo en aquellos lugares la química funcionaba espontáneamente, empujada por la termodinámica. Unas sencillas moléculas se fueron haciendo más y más complejas, llegando al laborioso y multivalente ARN el cual se hizo “luz de gas” a sí mismo al “parir” una molécula que se replicaba mejor que él, el ADN, y otra molécula que metabolizaba mejor que él, la proteína. Y pasó a un segundo e importantísimo término. Recordemos cómo esos pequeños “personajes” se protegieron dentro de una burbuja de doble capa lipídica y se lanzaron a colonizar los mares.

Creo que llegó el momento de presentarlas en sociedad: las bacterias, con sus dos dominios familiares de las eubacterias y arqueobacterias. Hace 3.800 millones de años, cuando comenzó el Arcaico, allí debían de estar, con la más simple de las estructuras.



Colonia de bacterias Oenococcus (Wikimedia, dominio público) y un corte de la estructura celular de una bacteria tipo

Aunque la figura anterior de *Oenococcus* corresponde a bacterias actuales, las primitivas debían ser muy parecidas, con sus membranas protectoras en donde se generaban las pilas de energía en forma de adenosín trifosfato (ATP), su material genético arrollado formando los nucleótidos y los ribosomas como centros de producción de proteínas.

Unas encontraron sus garbanzos consumiendo compuestos de azufre, otras desgranaban la glucosa en ausencia de oxígeno, otras aprendieron a obtener la energía de la luz y otras a base de sintetizar metano. Habían conquistado variadas formas de sobrevivir, aunque todas compartían las mismas necesidades básicas. Todas ellas necesitaban una gran cantidad de carbono, oxígeno e hidrógeno, y otros elementos como nitrógeno, azufre, fósforo, hierro, magnesio, sodio, cloro... Todas necesitaban ensamblarlos formando moléculas funcionales para que sus máquinas no se pararan. Todas precisaban de energía externa y de un proceso como la quimioósmosis por la que la empaquetaba en forma de ATP. Habían también descubierto la forma de multiplicarse siguiendo rutas comunes. Al igual que cualquier ser vivo actual. No hemos cambiado demasiado.

Buscando una posible explicación de esta universalidad del metabolismo nos encontramos de nuevo con la ya conocida teoría de flujos de energía de Morowitz y Smith de la que ya hablamos en una entrada anterior. Como ya sabemos, la teoría postula que la Vida apareció espontáneamente en un contexto geoquímico de estrés energético, al igual que un rayo surge espontáneamente en una situación de estrés de cargas electromagnéticas entre la tierra y las nubes. Todo habría sido un encadenamiento de hechos causa-efecto a través de estados termodinámicos, los más estables posibles, cada vez con un mayor orden interno gracias a un mayor y más eficiente consumo energético. Este determinismo del suceso explicaría el porqué de que el núcleo de los procesos metabólicos haya sido tan estable a lo largo de los años.

De esta causalidad resultante de equilibrios energéticos progresivamente más ordenados derivaría, por un lado, el hecho de que el inicio del camino de la Vida fuera único, y por otro el que el proceso siga y que además siga sujeto a un continuo desarrollo sin irreversibilidad posible. Posiblemente en un inicio los cambios fueron muy rápidos, bruscos y elementales, completándose posteriormente de forma más lenta con diversos refinamientos metabólicos.

Según la teoría de Morowitz la Vida sería, por tanto, un mero resultado de una inevitable aglomeración de actores, procesos y funciones, hasta cierto

punto autónomos, que han ido surgiendo paulatinamente y que siguen siendo los mismos hoy en día. Una fría y maquinal consecuencia de las energías geoquímicas y solar, más que una innovación gestada por la biología. Según esto, primero habría sido el metabolismo con su química y luego, gracias a que éste había generado las posibilidades precisas para ello, a su alrededor se habrían formado las estructuras.

Si esto es cierto, la consolidación del metabolismo como conjunto de reacciones bioquímicas y procesos físico-químicos bases para la Vida debió ser anterior al hecho de que la replicación fuera un coordinado proceso macromolecular. Primero las enzimas y después los genes.

Usando palabras de Morowitz *“el metabolismo básico no ha cambiado en los últimos cuatro mil millones de años y se ha mantenido vivo en las bacterias que se reproducen cada 20 minutos. Este mecanismo tan fuertemente conservado podría ser el único camino, lo que significa que se podría encontrar en todas las partes del universo donde haya vida. Podríamos ir a Marte y encontrar el mismo metabolismo intermediador. Se podría incluso decir que la vida se formaría en cualquier planeta que tuviera la química, la temperatura y la fuerza de gravedad adecuadas”*.

De todas formas, una vez más, hemos de decir que ésta es una de las múltiples teorías sobre el inicio del metabolismo. Sabemos que hay otras, como la de Martin y Rusell que vimos en el capítulo anterior, que postulan que todo fue el resultado del juego evolutivo de moléculas, más o menos complejas, en entornos favorables para ello y siguiendo exclusivamente las leyes de la química y la termodinámica.

Sea cual haya sido el camino, lo que sí es comprobable es el resultado, los diversos caminos metabólicos que seleccionó la Vida. En el próximo capítulo comenzaremos a profundizar en el tema: veremos quiénes son y cómo actúan las moléculas que gestionan la energía en las células. El primer paso para conocer el común código universal del metabolismo.

07. Rudimentos de gestión energética

En el capítulo anterior hablábamos sobre el escenario del nuevo eón, el Arcaico, y de cómo en este escenario comenzaban su andadura unos organismos ya perfectamente estructurados y que aún dominan el mundo actual: las bacterias. En la entrada de hoy comenzamos a desmadejar el código común de conducta metabólica que inventaron aquellos diminutos seres, y que comparten ballenas, secuoyas y levaduras.

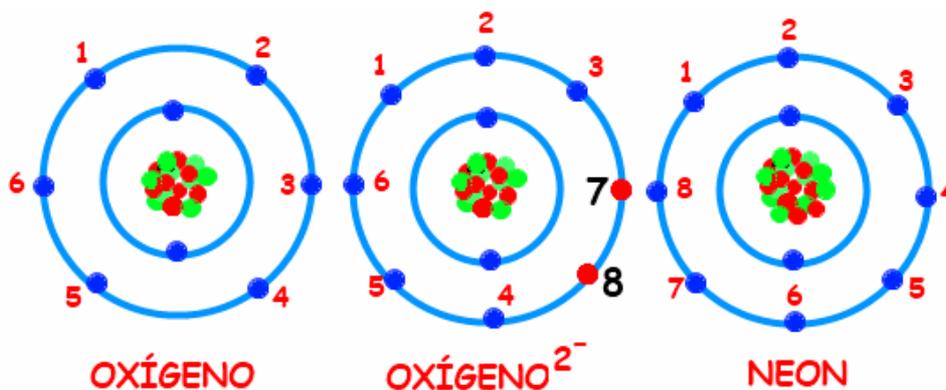
Para empezar a andar nos preguntaremos: ¿cómo es este manual de conducta universal?

Planteada esta cuestión merece la pena hacer una aproximación teórica a lo que son los procesos metabólicos, con la intención no sólo de disfrutar del conocimiento, sino también de admirarse con la compleja sabiduría de la naturaleza. En su desarrollo, más que una serie cronológica, despiezaremos los eslabones del proceso químico.

En el inicio del camino metabólico se colocan aquellos seres que recogen sus necesidades, básicamente CO_2 y H_2 , directamente del mundo inorgánico, son los autosuficientes; llamamos a estos seres *autótrofos*. No les quedó más remedio, ya que no había nada más que la química exterior de donde aprovisionarse. Todos ellos llevan en el bolsillo una guía metabólica cuyo núcleo está constituido por unas 500 pequeñas moléculas (en fin... relativamente pequeñas... todo lo pequeño que se pueda ser con 200 protones organizados), las mismas en todos ellos. **Necesitaban energía**, y la encontraron en la sencilla química de las reacciones de oxidación y reducción: las *reacciones redox* indisolublemente unidas, ya que si hay una oxidación es porque a la vez se ha dado una reducción, y viceversa. Para imaginar mejor las bases de los procesos metabólicos que manejan la energía, nos pararemos un poco en la explicación de este tipo de reacciones.

El motor de la Vida se encuentra en la energía de los electrones, en cómo se comportan. Hay elementos químicos que están hambrientos de ellos, mientras que otros prefieren perderlos de vista. Todo depende de qué es lo que tienen que hacer para que su configuración química se asemeje a la de un estable gas noble: o quieren electrones, como el oxígeno que está a dos

pasos del neón, o quieren deshacerse de ellos, como el litio, que con un paso atrás se iguala al helio. No es que se transmuten en un gas noble, tan sólo lo hace su configuración electrónica pasando a ser iones positivos o negativos. En los ejemplos anteriores O^{2-} y Li^+ . No os horricéis los físicos, pero no me puedo resistir a plantear una sencilla regla nemotécnica que refleja los dos procesos: como el oxígeno ha “reducido” la carga eléctrica -ahora es más negativa-, diremos que se ha *reducido* mientras que el litio diremos que se ha *oxidado*, aprovechando la fama real que tiene el oxígeno de acaparar electrones (en este caso bien pudo aprovechar de dos átomos de litio para formar el Li_2O). Esto nos da una pincelada con la que entendemos mejor lo que queríamos decir en el primer capítulo, cuando hablábamos de la atmósfera terrestre reductora, con CH_4 , NH_3 , SH_2 y H_2O (el hidrógeno regalando su electrón) o de la oxidante, con CO_2 , O_2 , SO_2 y H_2O (el oxígeno chupándolos). Dicho todo lo anterior nos hemos de quedar con la idea fundamental de que *los electrones son los motores energéticos*, y por tanto sabemos que quien los obtenga, reduciéndose, se habrá cargado de energía. En cambio, el que se oxida la ha liberado. Está claro que el juego de la energía está en el alma de las reacciones redox.



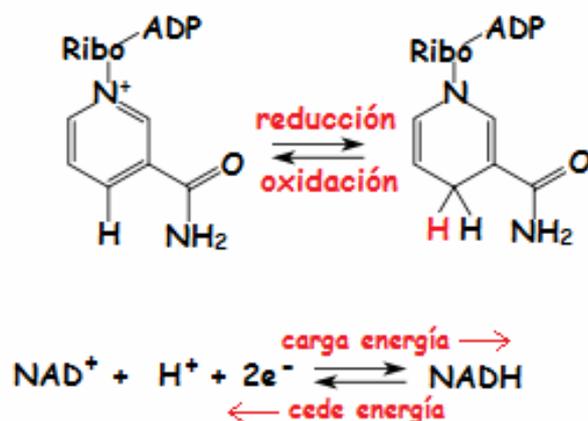
El oxígeno toma dos electrones para asemejarse al neón

Dicho lo anterior, volvemos a nuestros primitivos autótrofos. Realmente fueron pertinaces en la búsqueda de energía. La encontraron por doquier, unos la vieron en los enlaces químicos de algunas moléculas inorgánicas y otros en la posibilidad de aprovechar la energía de las ondas luminosas. Pero, ¿cómo arrancarla de sus portadores? Y dado que los procesos de alimentación y de metabolización no son coincidentes en el tiempo, ¿cómo almacenarla para cuando hiciera falta?

La solución no llegó de repente, sino a través de sucesivos pasos pastoreados por la presión del medio, que evolucionaron hacia el mecanismo compartido por casi todos: la cadena de transporte de

electrones, con la traca final de la quimioósmosis. Estos electrones se consiguen de unos compuestos muy simples llamados *moléculas reducidas*. Sorprendentemente el papel director de este proceso lo asumieron casi desde el principio las membranas lipídicas, las mismas a las que “simplemente” se les había pedido que aislasen el citoplasma celular.

Antes de comenzar el viaje por los entresijos energéticos de las células presentaré otras actrices superimportantes del metabolismo energético, que son las humildes currantes de todos estos procesos: las parejas de coenzimas (a la derecha su forma reducida) NAD/NADH, NADP/NADPH y FAD/FADH₂. Con sus interminables reacciones de reducción-oxidación se constituyen en transportistas de electrones mediante un incesante ciclo de “tomo un electrón, me lo llevo, lo suelto y vuelvo a por otro”. Todos actúan más o menos igual.



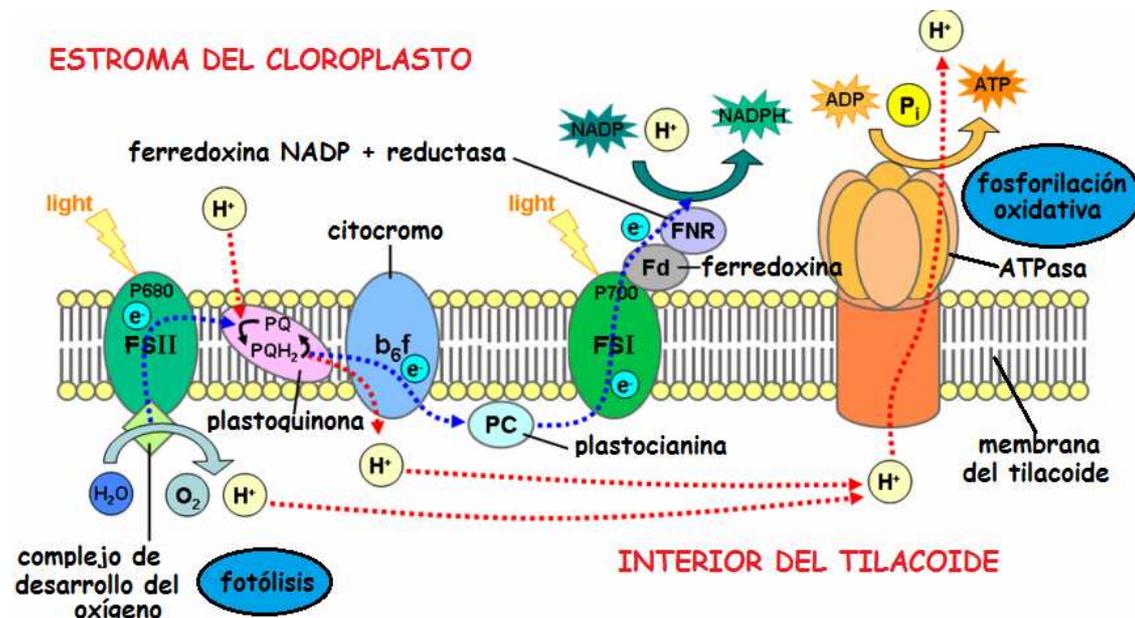
El laborioso NADH

Cadena de transporte de electrones

Pero ataquemos ya eso de la *cadena de transporte de electrones*. Todo empezó por conseguir electrones libres que se necesitaban para que el CO₂ fijara protones (H⁺) y se transformara en azúcares. Esto se logra oxidando compuestos sencillos -los que más arriba habíamos llamado *moléculas reducidas*- que rompen alguno de sus enlaces, cediendo un electrón portador de la energía del mismo. Estas moléculas pueden ser muy variadas, tanto inorgánicas como el agua, el ácido sulfhídrico SH₂ o el ión ferroso Fe²⁺ de la pirita, u orgánicas como la glucosa o aminoácidos. En estos casos en el proceso se obtiene energía puramente química, y por eso se le conoce como **quimiosíntesis**. Los organismos que optan por esta vía se les conoce como *quimiótrofos*: *litótrofos* si la energía la obtienen de moléculas inorgánicas y *organótrofos* si proviene de orgánicas.

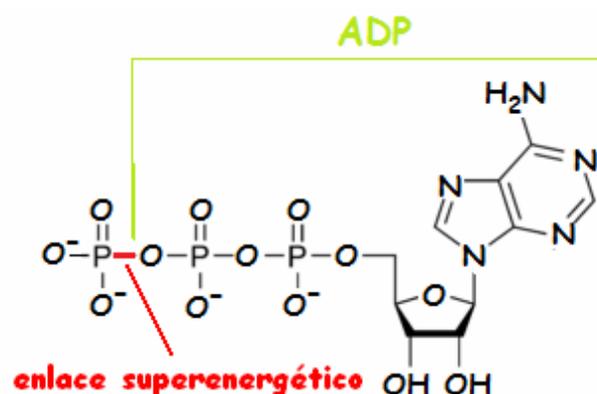
Pero también se puede conseguir energía a partir de la luz, cuyos fotones excitan a una molécula de clorofila de forma que *algunos de sus electrones* saltan a un nivel energético superior. Estos electrones pasan progresivamente a otras moléculas a través de una cadena de transmisión, cediendo durante el recorrido parte de su energía. A este proceso alternativo se le conoce como **fotosíntesis**, también con sus variantes litótrofas u organótrofas, y a los organismos que la practican *fotótrofos*. Muy al principio del invento, la clorofila reponía los electrones que iniciaban el flujo tomándolos de moléculas reducidas como el SH_2 o de compuestos del hierro que dejaba oxidados. Pero la evolución la llevó hacia un proceso más eficiente: los primeros compuestos químicos dadores de electrones fueron sustituidos por el agua (a fin de cuentas oxígeno reducido, OH_2), liberando en el proceso una molécula de oxígeno y dos e^- . Se había pasado de la fotosíntesis anoxigénica a la oxigénica, de dejar como residuo el azufre a que fuera el oxígeno el residuo.

En la figura siguiente se puede ver el proceso de la fotosíntesis, siendo la línea de trazos azules la conductora de la cadena de transporte de electrones. Profundicemos un poco más en lo que nos muestra.



Cadena de transporte de electrones de la fotosíntesis. Todo sucede en la membrana del cloroplasto, el tilacoide. Se diferencian el camino de los electrones (en azul) hacia el NADPH que ayudará a fijar el CO_2 y luego el camino de los H^+ (en rojo) que ayudará a embalsar energía en forma de ATP (Wikipedia, dominio público)

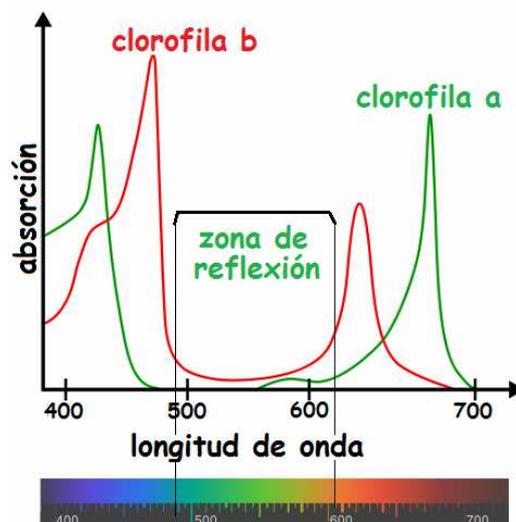
Hemos conseguido lo que buscábamos: electrones libres y vigorosos a los que les vamos a arrancar su energía. Y como sucede en la cadena de comercialización de cualquier producto, donde el valor de los bienes se lo van repartiendo los distintos intermediarios, aquí pasa lo mismo: estos electrones van pasando de mano en mano, cediendo parte de su energía de molécula en molécula, hasta un último receptor que se reduce químicamente y se queda con el último y más débil electrón. Un *primer resultado*, el más evidente, es que aparece un subproducto de las primeras rupturas. En el caso de la quimiosíntesis, si partió de la rotura del sulfhídrico (SH_2), es el mismo S_2 , y si es en la fotosíntesis oxigénica, que partió de la descomposición del agua mediante su fotólisis, fenómeno por el que se produce su rotura en 2H^+ y $1/2\text{O}_2$, se obtiene O_2 libre. Como ya hemos insinuado un poco antes, la modalidad en la que interviene el oxígeno es la más eficiente desde el punto de vista energético, ya que este elemento es, después del flúor, el que tiene el mayor poder oxidante de la tabla periódica. En una *segunda instancia* el último electrón de la cadena se lo queda una molécula ya conocida, una NADP que se lo guarda en su mochila para cedérselo en algún momento del proceso metabólico a un CO_2 , que con la participación de algún H^+ se transformará más tarde, durante el rodar del ciclo de Calvin -del que hablaremos unos párrafos más abajo-, en un azúcar. Y un *tercer producto* es el ATP, ya que resulta que cada intermediario no sólo recibe y pasa electrones, sino que en cada intercambio fuerza el paso de protones (es decir, iones H^+) del exterior de alguna membrana del cloroplasto a su interior, produciendo un desequilibrio iónico... ¿nos suena de lo que había en el entorno de los venteos alcalinos submarinos?



Fórmula del Adenosin TriFosfato, ATP. No nos debe sorprender su universalidad como moneda de cambio energética ya que, si lo observamos, su estructura monofosfatada es uno de los nucleótidos que conforman el ARN, nuestro viejo personaje del mundo del ARN (Wikimedia)

Este desequilibrio iónico no es sólo un tema poblacional, sino que su efecto más especial es que supone un desequilibrio de cargas eléctricas a ambos lados de la membrana con un valor de unos 150 milivoltios. No parece una gran diferencia de potencial eléctrico, pero hay que tener en cuenta que esta pequeña diferencia se produce entre un lado y otro de una membrana de tan sólo 5 millonésimas de milímetro, es decir la intensidad del campo eléctrico entre ambos lados es de unos 30 millones de voltios por metro, casi del orden de la de un rayo. Esto supone mucha energía embalsada y disponible y se la conoce como la *fuerza protón motriz*. Veamos cómo se aprovecha.

Una proteína específica, que se halla embebida en la membrana separadora -la ATPasa-, permite el paso de los protones en sentido inverso, restableciendo el equilibrio iónico inicial, en un proceso llamado **quimioósmosis**. En el bombeo a contracorriente de la proteína se van fabricando moléculas de ATP, que como hemos dicho son las baterías de cualquier organismo vivo: en el ATP el enlace del ADP (adenosín **D**ifosfato) con el tercer fósforo es superenergético. El sistema es bastante “inteligente”, ya que así se consigue tener acumulada **toda** la energía conseguida del exterior, que se va a ir utilizando según necesidades, al igual que en una central hidráulica donde se acumula agua y se suelta según la demanda de energía eléctrica. Si no hubiera este embalsamiento intermedio en forma de ATP los procesos energéticos no serían tan eficientes, perdiéndose en calor mucha de la energía que procesamos desde los alimentos.



Curva de absorción de la luz de las clorofilas a y b, donde se puede observar que existe una zona de reflexión correspondiente a las frecuencias del verde (a partir de Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

En el caso del proceso de la fotosíntesis participan de forma secuencial dos moléculas de clorofila ligeramente diferentes. Del trabajo de la primera, la **clorofila b** situada en la trampa para la luz llamada FotoSistema II, salen como subproducto protones H^+ , que se utilizarán para formar ATP, y del trabajo de la segunda, la **clorofila a** del FotoSistema I, sale el NADPH que ayudará en los procesos metabólicos del organismo a capturar CO_2 de forma que se produzca “alimento”. Menciono esta diferenciación, que se puede ver en la figura anterior, ya que es necesaria conocerla para entender el proceso evolutivo que llevó a las bacterias hacia la fotosíntesis dominada por las cianobacterias.

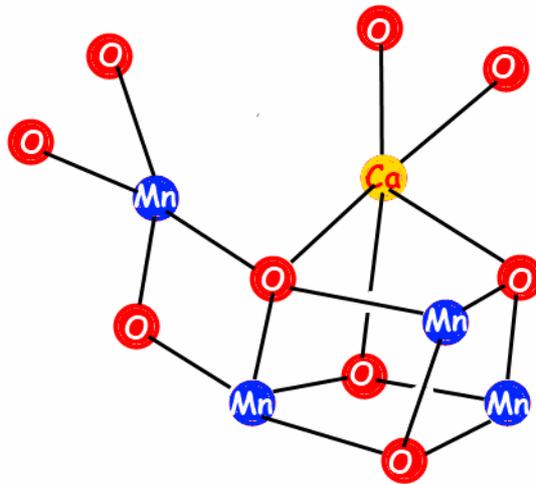
Cada uno de estos fotosistemas es sensible a una determinada longitud de onda de la luz solar. Uno en el entorno de la luz azul y el otro en la zona roja del espectro. Sin embargo, ambos reflejan la parte intermedia entre el azul y el rojo, que corresponde al color verde. Ésta es la razón por la que los organismos que tienen clorofila en sus células tienen color verde.

No se sabe muy bien como sucedió el invento de este complejo proceso, pero una teoría bastante aceptada, ideada por el bioquímico John Allen, de la universidad Queen Mary de Londres, postula lo siguiente.

Inicialmente algunas bacterias aprendieron a usar la luz como fuente primaria de energía. Aliadas con una molécula que tenía en su interior átomos de manganeso, alguna clorofila rudimentaria, unas bacterias desarrollaron el camino de fijación del CO_2 semejante al que realiza el FotoSistema I, y otras el camino de empaquetamiento de energía en píldoras de ATP, como hace el FotoSistema II. Algún error de transcripción, o alguna presión externa, hizo que el gen que expresaba las clorofilas se duplicara dentro de una bacteria, por lo que se encontró con dos fotosistemas. Esta hipotética bacteria pionera debía vivir en un entorno que con toda seguridad experimentaba cambios a lo largo del ciclo anual: épocas de abundancia de materia prima sin ningún problema para alimentarse y épocas en las que escasearía. Durante el periodo de vacas gordas sintetizaría azúcares a partir del CO_2 , y en la temporada de carestía sintetizaría ATP para el futuro. Poco a poco cada una de las dos clorofilas “hermanas” resultantes de la duplicación se fue especializando en una función diferente, lo que nos ha permitido llamarlas con el tiempo FS I y FS II. Pero ya que el metabolismo de las bacterias es muy limitado, hace sólo lo imprescindible ¡hay que usar la energía prudentemente!, por lo que no hacía funcionar a la vez a los dos fotosistemas, sino de uno en uno según necesidades. La realidad es que en el mundo primitivo, donde todo esto sucedía, había una gran abundancia de manganeso y hierro, átomos

que son fácilmente oxidables (en aquel momento la presión de la radiación ultravioleta aún debía ser importante) abandonando tras de sí unos electrones. El resultado es que el FS II se encontró en un ambiente muy rico en e^- que de alguna manera sobresaturaba su función y la bloqueaba. Alguna nueva casualidad hizo que progresivamente el FS I “recordara” su capacidad de trabajar como el FS II, y comenzó a usar los electrones para generar ATP, con lo que se descongestionó la bacteria. La coordinación resultó ser más eficiente que la descoordinación, lo cual supuso una ventaja para los que se coordinaban. La selección natural hizo el resto.

El último paso, con el cual culminó la fotosíntesis oxigénica, se dio cuando el FS II encontró a una molécula especial hecha de oxígeno, calcio y manganeso, la molécula OEC -*Oxygen Evolving Complex*-, con una avidez total por los electrones, que era capaz de acompañar la fotólisis del agua y pasarle los e^- que aparecían a la molécula de clorofila FS II. Se quedaron las dos unidas y comenzó la fotosíntesis oxigénica.



La molécula OEC -Oxygen Evolving Complex-, complejo de desarrollo del oxígeno, encargada de la hidrólisis del agua durante la fotosíntesis

¡Bueno! Fin de la *fase Uno*. Ya tenemos la *energía empaquetada* a disposición de quien la necesite, y unos subproductos tan importantes como el O_2 molecular y libre, que en su momento fue el que relleno la atmósfera terrestre.

Pero aún nos queda una *fase Dos*, en la que *vamos a capturar materia* y la vamos a ensamblar formando polímeros básicos para nuestro metabolismo, aquellos que nos darán energía en forma de azúcares y grasas, formarán aminoácidos que construirán proteínas, fabricarán ácidos

nucleicos y mantendrán las múltiples membranas celulares, tan importantes por su labor de contención física y de desequilibrios iónicos. O dicho en forma poética: ¡vamos a alimentarnos! La respuesta, en el próximo capítulo.

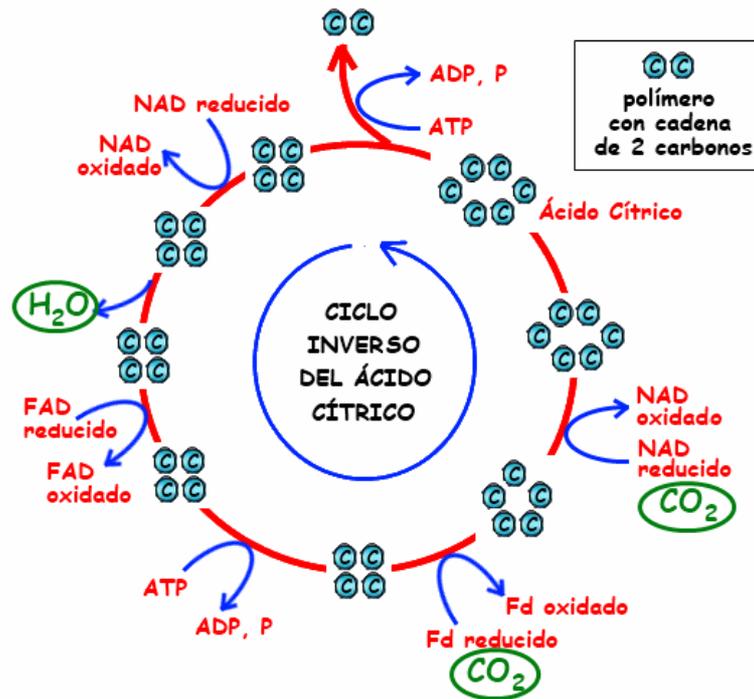
08. El metabolismo constructor

En los capítulos anteriores hemos hablado de que los seres vivos necesitan energía y materia prima para sobrevivir. La primera parte de esta pareja de necesidades quedó explicada en el capítulo anterior, en el que presentamos cómo los seres vivos son capaces de empaquetar energía externa para sus usos metabólicos. Hoy nos toca hablar de la otra cara de la moneda: el metabolismo.

El metabolismo nació cuando las proteínas entraron en escena asumiendo la función de catálisis que les cedió el ARN. Con las naturales mutaciones de los genes que las expresaban se iba incrementando el panel de proteínas disponibles. Las cuales irían colaborando unas con otras, iniciándose así un rudimentario metabolismo, que por el método de éxito-error se fue decantando hacia aquellas relaciones que fueran más eficientemente. Hasta consolidarse las rutas metabólicas que hoy conocemos.

Ya sabemos cómo las primeras protobacterias prosperaron en medios con temperaturas casi de ebullición, con presiones inmensas y en chimeneas submarinas que escupían azufre, arraigadas en lo más primitivo y profundo del árbol de la Vida.

Hoy en día existen algunas bacterias de metabolismo muy simple y primitivo, que para construir sus organismos utilizan un ciclo anabólico que coincide en su base con el usado generalmente por la mayoría de los organismos para conseguir la energía y las biomoléculas que precisan. Lo más habitual es hacerlo a través del llamado ciclo de Krebs, del que hablaremos dentro de poco, aunque las primitivas bacterias de las que hablamos lo hacían girar al revés: es conocido como el **ciclo inverso del ácido cítrico**. Algunos científicos, como Harold J. Morowitz, piensan que una versión muy simplificada de este proceso pudo ser una opción metabólica posible en las condiciones prebióticas de la Tierra, cuando se constituyó como un motor autónomo de la síntesis de todos los precursores bioquímicos: el ciclo inverso del ácido cítrico, en sus formatos más iniciales y sencillos, sería la hoja de ruta que utilizaban los primeros seres *autótrofos* -aquellos que se buscan la vida por ellos mismos y no necesitan de los demás- *para crear pequeñas biomoléculas a partir del CO₂ y el agua*.



La idea está fundamentada ya que existen hoy en día ciertas bacterias, como la termofílica y autotrófica *Aquifex Hydrogenobacter*, uno de los linajes más antiguos de estos seres, que utilizan el ciclo inverso del ácido cítrico para sintetizar los polímeros orgánicos más esenciales a partir del CO_2 . Y lo sorprendente es que este ciclo, y sus redes de polímeros secundarios, son autocatalíticos, de forma que sus subproductos incrementan la eficacia de su propia síntesis. Algo así pudo ser el principio del metabolismo.

Con posterioridad todo se hizo más complejo. El ciclo inverso del ácido cítrico tomó su giro habitual, dando lugar al **ciclo de Krebs**, y apareció una nueva rueda metabólica, el **ciclo de Calvin**. Ambos son sofisticados ciclos autocatalíticos formados por cadenas de moléculas orgánicas que se van dando la mano para volver al punto de partida. Vamos a analizar a ambos.

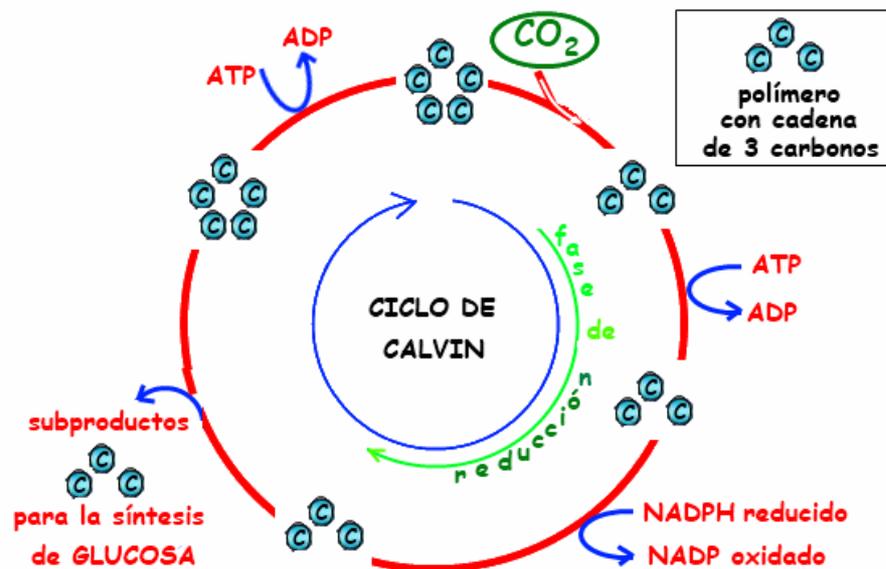
Comenzaremos con el ciclo de Calvin ya que es el complemento de la fotosíntesis, de la que aprovecha los ATP's y NADPH's que ha generado que, como sabemos, son unos fantásticos transportistas de energía. A partir de este ciclo, organismos como las plantas fijan el carbono y fabrican glucosa para sus reacciones metabólicas. Se trata también de un proceso *anabólico* por el que, mediante la adición de energía vía ATP y del poder oxidoreductor de las coenzimas, como el NADP, *se integran moléculas inorgánicas de dióxido de carbono (CO_2) y se convierten en moléculas orgánicas sencillas*, a partir de las cuales se

formará el resto de los compuestos bioquímicos que constituyen los seres vivos. Éste es el proceso por el que consiguen energía y materiales de construcción **todos** los seres vivos *autótrofos*, ya sean *fitótrofos* -que obtienen la energía a partir de la de la luz, como las plantas- o *quimiótrofos* -que la obtienen a partir de la de los enlaces químicos, como algún tipo de bacterias-.

La ecuación resumen del catálogo de reacciones químicas que se producen a lo largo del ciclo de Calvin es la siguiente, donde P es el fósforo:



El dióxido de carbono se transforma en una preciada molécula de glucosa, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, mediante el “sacrificio” de nuestras conocidas moléculas energéticas NADPH. No importa, pues se recuperarán con creces durante los procesos catabólicos de la célula.



Ciclo de Calvin, mediante el que los organismos fotosintéticos fijan el dióxido de carbono y generan los precursores para la síntesis de glucosa

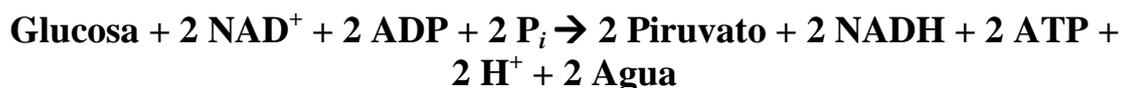
En la imagen anterior vemos cómo en el ciclo entra CO_2 en el momento procesal de la parte superior mientras que por la parte inferior sale una molécula de tres átomos de carbono - gliceraldehído fosfato (GAP)- que será la base a partir de la cual se formen azúcares como la fructosa y la glucosa. También, a partir de estos azúcares, se formarán directa o indirectamente las cadenas de carbono que componen el resto de biomoléculas que constituyen los seres vivos (lípidos, proteínas, ácidos

nucleicos, etc). Hasta aquí la estrategia que siguen los organismos autótrofos.

Pero, ¿qué pasa con los seres heterótrofos? Llamamos heterótrofos a aquellos que no buscan energía ni construyen sus organismos con las sencillas moléculas de su entorno (dióxido de carbono, oxígeno o agua) sino que todo lo consiguen directamente mediante la ingesta de autótrofos vegetales o devorando a su vez a otros seres heterótrofos ¿qué hacen con la materia prima ingerida? ¿qué estrategias se ven obligados a adoptar en cada uno de los ambientes donde se encuentre un organismo heterótrofo? Ya sea en el fondo del mar, como en un principio, o más tarde en la cúspide de una montaña, ya sea en condiciones extremas o en el trópico, tanto se disponga de oxígeno como se viva en la más absoluta ausencia de esta molécula.

Los caminos de esta faceta metabólica a la fuerza tenían que ser variados. Y de hecho se encontraron soluciones para todos los gustos. Adaptadas al medio, aprovechando al máximo las posibilidades, unas más eficientes que otras. Vamos a comentar aquellas más generales y que cubren la mayor parte de lo que se conoce como rutas metabólicas.

Todas ellas suelen comenzar con la glucólisis, que no es nada más que la “digestión” de la glucosa, con el objeto de conseguir energía. Tras un proceso de múltiples transformaciones moleculares se obtiene la tan buscada energía en forma de ATP. El resumen del proceso total lo recoge la ecuación siguiente:

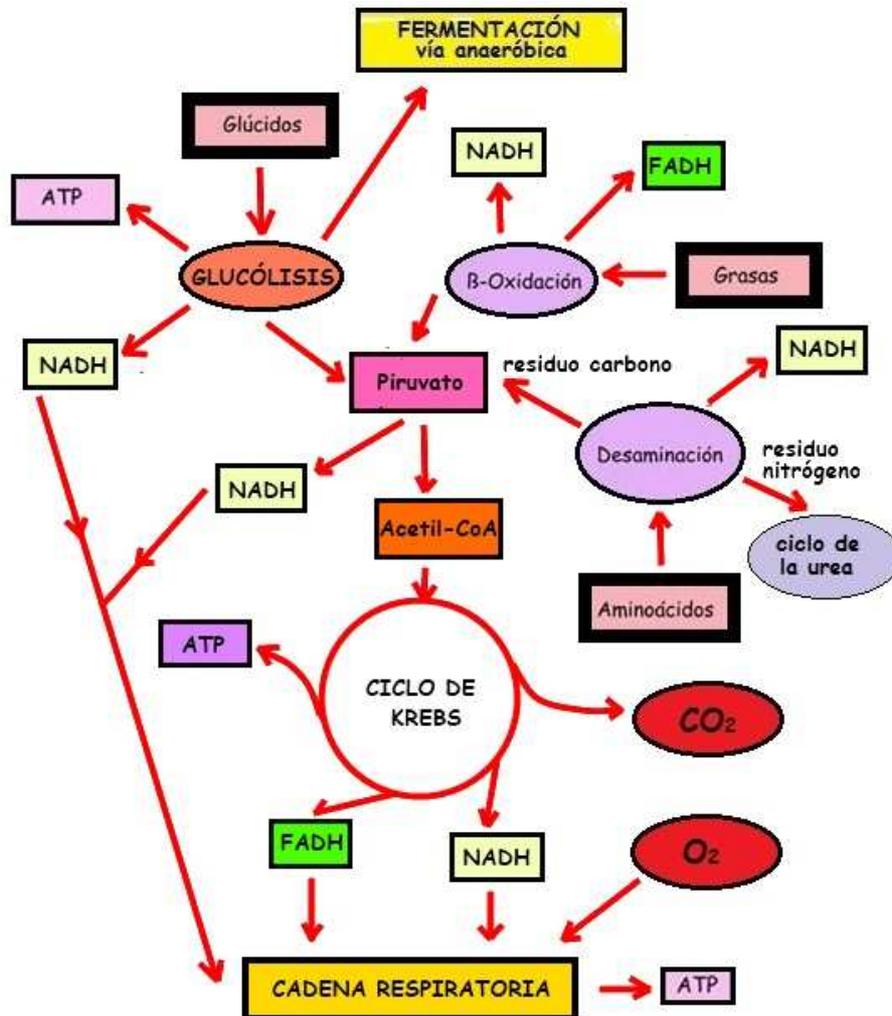


Después de que la molécula de glucosa se haya transformado en dos moléculas de piruvato, que es un polímero con tres átomos de carbono, éste continúa su camino que dependerá de cuál sea el medio donde se encuentre el organismo metabolizador: *la diferencia la da si hay o no hay oxígeno disponible.*

Metabolismo aeróbico

En un mundo oxigenado, el piruvato se dirige hacia un nuevo ciclo metabólico que ya hemos mencionado con anterioridad, el ciclo de Krebs, para acabar con una cadena respiratoria de cesión de electrones muy parecida a la que ya explicamos en la entrada anterior al hablar de la fotosíntesis, y que como receptor final de esos electrones se apoya en el

oxígeno que pasa a formar agua. Al conjunto de estas rutas metabólicas se le conoce como respiración celular.



Caminos metabólicos del anabolismo y catabolismo del carbono. En su mayoría se corresponden a procesos de la respiración celular aeróbica.

Centrémonos en la figura anterior. Los elementos de partida son los *glúcidos* (glucosa y otros azúcares), *grasas* y *aminoácidos*, los cuales van a ser despiezados en un molino circular. Los tres, tras seguir caminos diferentes, llegan a generar piruvato, que se degrada a Acetil-CoA para entrar en el ciclo de Krebs que, como el de Calvin, también genera precursores de muchas biomoléculas así como energía en forma de ATP y coenzimas con poder de reducción (FADH y NADH). En el camino deja un residuo de CO₂.

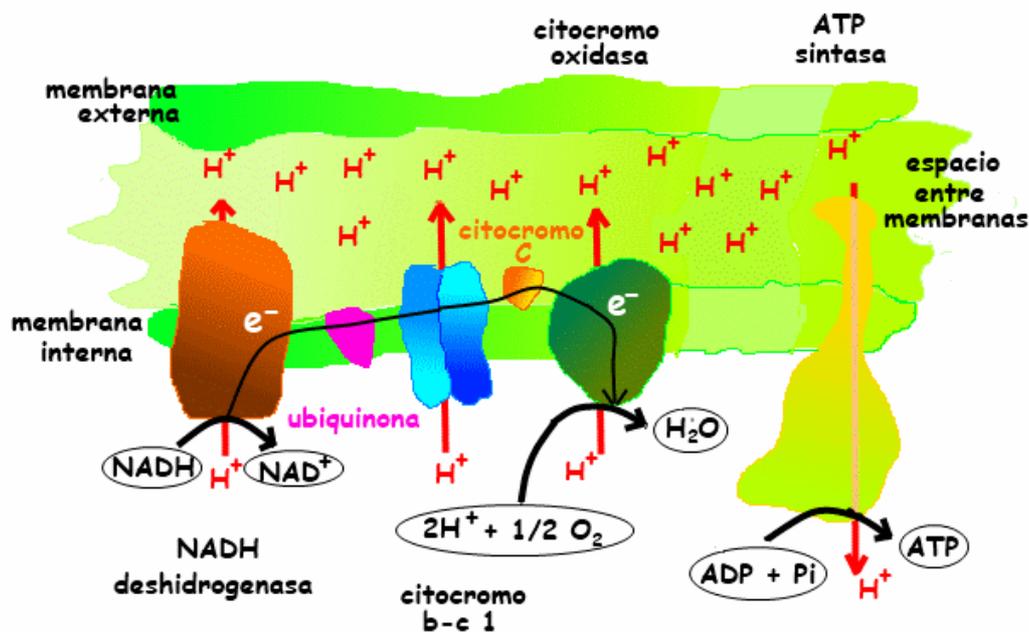
Es un conjunto de procesos *anabólicos* -en los que se produce la biosíntesis de polímeros- y *catabólicos* -procesos en los que se rompen los

polímeros y se almacena la energía química obtenida-. Así como el anabolismo es la herramienta inventada por los seres autótrofos, los heterótrofos añadieron reacciones catabólicas para complementar las básicas, centrales y universales anabólicas.

La cadena respiratoria

El último paso del proceso de respiración tiene lugar en las membranas de las mitocondrias, un orgánulo que es la auténtica central energética de las células y de las que hablaremos más tarde en un capítulo posterior que dedicaremos al eón Proterozoico, cuando estemos siguiendo la pista de su aparición en la escena de la Vida.

Te recomiendo ver la figura de más abajo mientras lees la descripción de lo que ocurre. Se trata de aprovechar toda la capacidad energética de las coenzimas NADH y FADH que se habían generado durante el proceso de respiración aeróbica, para iniciar una última cadena de transporte de electrones, cosa que consiguen al traspasar alguno de sus electrones al complejo enzimático NADH deshidrogenasa. Tras una alocada carrera a través de diversas enzimas en un proceso muy similar al explicado para la fotosíntesis, el electrón acaba en un *oxígeno que actúa como último receptor de e^-* . Al unirse a protones H^+ formará agua como residuo.



Cadena respiratoria de electrones, proceso que se da en las membranas de las mitocondrias de las células y cuyo objetivo fundamental es el conseguir energéticas pilas de ATP.

En el proceso, aprovechando la energía de los electrones viajeros, se van pasando iones H^+ del interior de la mitocondria a la zona intermedia de su membrana. Y todo este teje maneje se lleva a cabo para conseguir lo que realmente es crucial para la célula, almacenar energía para su supervivencia en forma de moléculas de ATP. Esto lo consigue mediante el bombeo inverso de los iones H^+ a través del complejo enzimático ATP sintasa, en donde la energía cinética de los iones se usa para formar un ATP.

El resumen global de la respiración aeróbica lo expresa la siguiente ecuación:



¡Realmente es un proceso generoso con la obtención de energía, como así lo indican los 38 ATP's libres que se han conseguido! Cada ATP liberará 7,3 kcal/mol en el preciso momento en que se necesiten.

Metabolismo anaeróbico

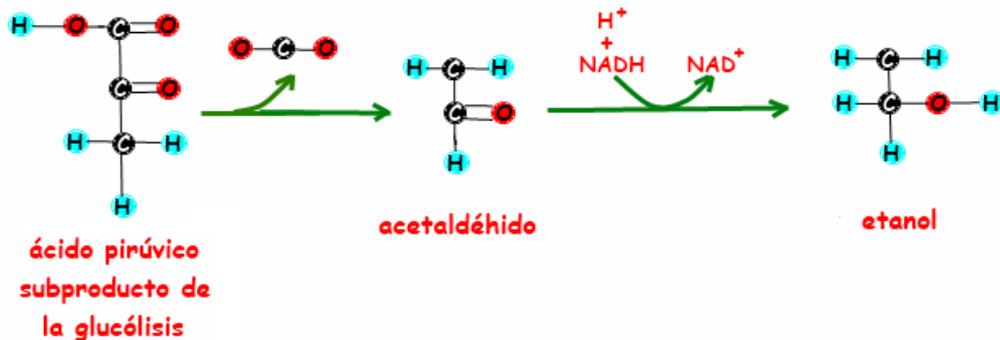
Pero no siempre hay oxígeno disponible, como en el fondo legamoso de un pantano, en la tripa de una vaca, en un cubo de leche vieja o en el mosto fresco de la tinaja de una bodega. Vamos a ver qué pasa en estas circunstancias y de qué manera se manejan las sencillas bacterias y levaduras que viven y prosperan en estas condiciones.

Pueden llevar a cabo dos procedimientos que les permite almacenar energía utilizable, ambos con un inicio similar y un final distinto. Los dos procesos son la **respiración anaeróbica** y la **fermentación** ¿Quién no ha oído hablar de la fermentación alcohólica que las levaduras producen en los azúcares de las uvas y que conducen al buen vino? ¿O de la fermentación láctica gestionada por bacterias como la *Lactococcus* que da yogures y queso?

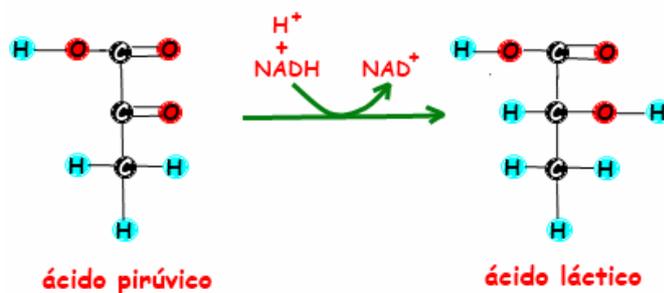
Comienzan con el asalto de la energía de la glucosa para obtener el piruvato, y de ahí por distintos caminos hasta el residuo final. Cuando hablamos de la respiración aeróbica decíamos que el baile de la cadena de transporte de electrones acababa siempre en un oxígeno, que se reducía al compás de unos iones de hidrógeno, produciendo en el envite una molécula de agua. Pues bien, tanto la respiración anaeróbica como la fermentación al no disponer de oxígeno como elemento último receptor de los electrones de los NADH producidos en la glucólisis, encuentran la misma función en compuestos inorgánicos, tales como sulfatos y nitratos durante la

respiración anaeróbica, utilizando para ello una cadena transportadora de electrones como las que conocemos, o en el caso de la *fermentación* a compuestos orgánicos, como el acetaldehído o el mismo piruvato, sin que medie cadena de transporte alguna. Y de ahí la menor eficacia energética en estos procesos comparada con la que se obtiene mediante la respiración aeróbica: el salto energético hasta el oxígeno es mayor que el salto energético hasta los últimos receptores de estos procesos anaeróbicos. Por ejemplo, en la fermentación sólo se obtienen 2 moléculas de ATP frente a las 38 que se producen durante la respiración aeróbica. A pesar de que en los mundos sin oxígeno los saltos energéticos aprovechables son menores, esto no quiera decir que no sean eficaces. Y si no que se lo pregunten a las bacterias *Clostridium* que prosperan en la tripa de los animales obteniendo con sus metabolismos unos resultados un tanto pútridos y desagradables.

Y sin embargo, éste es uno de los hechos diferenciadores entre los organismos simples y los complejos. En la figura siguiente podemos ver las reacciones químicas involucradas en algunos tipos de fermentación, tales como la *alcohólica* durante el proceso de vinificación o la *láctea* base en la confección de quesos o yogures.



FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA
(levadura *Saccharomyces cerevisiae*)



FERMENTACIÓN LÁCTICA
(bacterias *Lactobacillus*, *Streptococcus*)

Resumen metabólico

Después de conocer de forma somera las variadas estrategias que adoptan los seres vivos para su subsistencia, estamos en condiciones para proseguir por el sendero evolutivo de la Vida. El metabolismo nos puede parecer un aspecto que roza lo teórico dentro de la biosfera, pero ciertamente es una de sus bases y con él todo funciona. Por esta razón, permitidme que haga un último resumen que fije nuestros conocimientos antes de continuar con nuestra historia.

Los seres vivos necesitan materia prima y energía para construir sus organismos. El metabolismo dirige estas necesidades. Los procesos de “creación” constituyen el anabolismo, que utiliza la energía -producida durante el catabolismo- y moléculas sencillas, como el agua o el dióxido de carbono, para crear otras un poco más complejas, como los azúcares, aminoácidos, ácidos grasos y bases nitrogenadas, para posteriormente sintetizar los grandes polímeros que utilizan las células: polisacáridos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos. Los procesos de “destrucción” constituyen el catabolismo, que podemos asemejar como una productiva marcha atrás, ya que a través de ellos se generan las moléculas portadoras de energía de las que hemos hablado tanto, ATP, NADH o FADH₂, que se utilizarán durante el anabolismo, y se degradan las macromoléculas celulares hasta las más sencillas. Y volver a empezar a través de una enmarañada red de soluciones.



Esquema del proceder del metabolismo

Dentro de estos dos procesos generales también hemos visto como hay diversas variedades de plantear el metabolismo (a) según que los organismos sean autótrofos o heterótrofos; (b) según que la energía provenga de la luz -fotótrofos- o de los enlaces químicos de moléculas -

quimiótrofos-; o (c) según que los electrones que inician esta energía se obtengan de moléculas orgánicas -organótrofos- o inorgánicas -litótrofos-. Y la verdad es que en la naturaleza vamos a encontrar modelos que empleen cualquier terna a-b-c. Como pudiera ser el metabolismo auto-foto-litótrofo de nuestras conocidas cianobacterias; o como el de los animales que son hetero-quimio-organótrofos.

Ya sólo nos queda retornar a la senda y contemplar desde la lejanía cómo los seres vivos fueron conquistando los anteriores caminos metabólicos. Cosa que veremos en el siguiente capítulo, a lo largo del cual caminaremos hasta fijarnos además en las primeras evidencias fósiles de unos seres que ya conocemos, las asombrosas bacterias, que diseccionaremos como el adecuado colofón de una época en donde ellas fueron las únicas reinas, el eón Proterozoico.

09. La vida en el Arcaico

Tras dos capítulos dedicados al metabolismo, en este recuperamos la cronología de los hechos tal como pudieron haber ocurrido a lo largo del eón Arcaico. Seguimos en las profundidades de la edad del planeta, de 3.800 a 2.500 millones de años antes de hoy.

La Vida estuvo presente durante todo el eón Arcaico, desde su inicio, pero es probable que estuviera limitada a bacterias y archaeas, organismos procariotas (células sin núcleo) con doble membrana celular. Intentemos hacer ahora su historia cronológica.

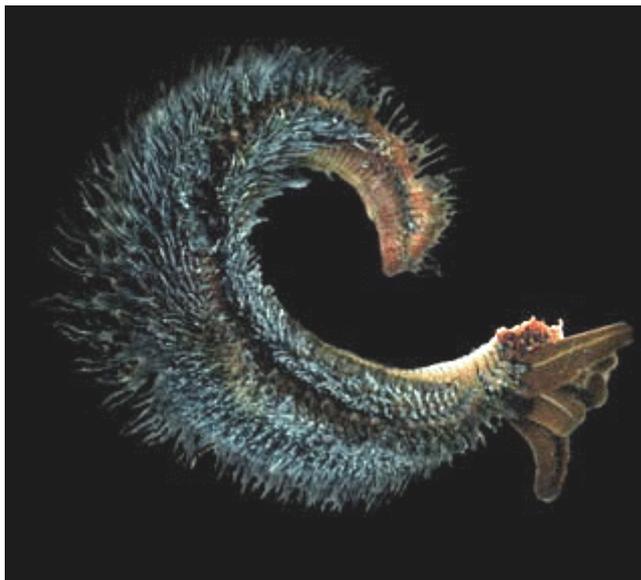
Por lo que hemos aprendido en los capítulos anteriores podemos imaginar a los primeros organismos vivos -a los que aún no me atrevería a definir como bacterias- viviendo en las porosidades de estructuras submarinas, gracias a la energía redox de las paredes de pirita y de la materia que proporcionaba el ambiente y la especial química del entorno, la cual había sintetizado, entre otras, moléculas orgánicas que permanecían disueltas en las aguas de las surgencias termales. Las aprovechaban para su desarrollo unos organismos que vivían de la caridad de la química practicando una obligada e incipiente heterotrofia y usando un sencillo metabolismo, posiblemente próximo a una fermentación.

Lograron escapar de la cárcel de piedra. Las más ancestrales y elementales bacterias que habían salido de los ventos submarinos empezaron a colonizar los mares protegidas por sus membranas. Allí habían estado cuidadas por el entorno abrigado de los poros de las rocas, alejadas de los muy temibles rayos ultravioletas, y ahora, libres, debían obtener sus necesidades en un mundo sin oxígeno a partir de las moléculas de tipo orgánico que se habían ido formado a lo largo de millones de años de evolución química.

Con posterioridad, y a medida que disminuía la cantidad de compuestos orgánicos disponibles, gracias a alguna mutación aprendieron a ser autónomas.

Su mundo era el submarino según unas teorías, o próximo a la superficie del océano, viviendo en el caldo primordial, según otras, en un momento

en que la atmósfera era densa, lo que dificultaba el paso de la luz solar y su energía asociada. Debieron conseguir sus garbanzos a partir de reacciones químicas exotérmicas y fijando el carbono a través del CO_2 disuelto en las aguas. Las pioneras debieron ser por tanto protobacterias autótrofas quimiosintéticas y anoxigénicas, que obtendrían la energía vital a partir de variados procesos químicos catabólicos en los que participaban iones metálicos o derivados del azufre, y que aún no generaban oxígeno como subproducto ¿Algo así debió ser nuestro LUCA?



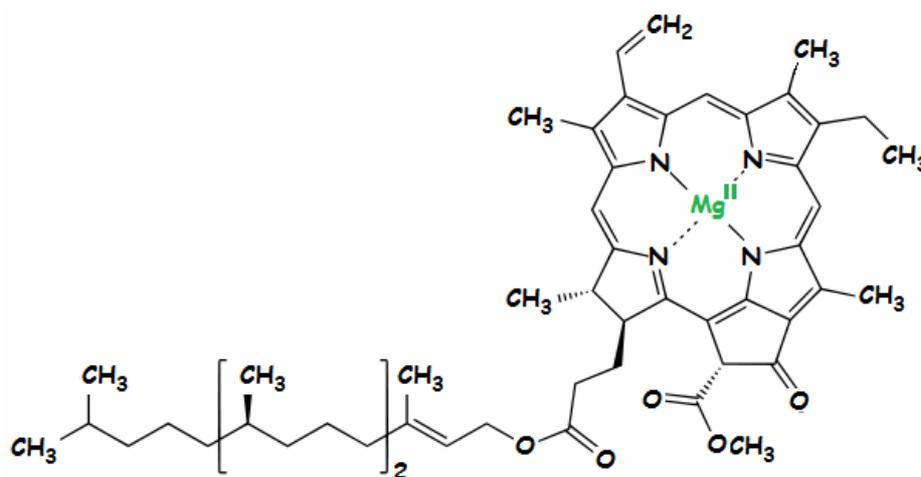
Alvinella pompejana un gusano de hoy en día que vive en las fuentes hidrotermales del océano Pacífico y que es capaz de soportar temperaturas de hasta 80°C . Su espalda está recubierta de bacterias quimioautótrofas (Wikimedia, dominio público)

El anabolismo quimioautotrófico ha quedado hoy en día limitado a los organismos evolutivamente más antiguos, lo que refuerza la opinión de un inicio de la Vida con este tipo de seres con metabolismo autotrófico. Al lado de esta solución metabólica se observa el gran recorrido posterior de la naturaleza hacia una extensa variedad de soluciones que han dejado arrinconado al ancestral quimioautotrofismo. Aunque no siempre, la evolución avanza normalmente añadiendo, más que quitando.

El incremento de la vida haría que los fondos marinos se fueran llenando de materia orgánica procedente de los infinitos “cadáveres” de bacterias muertas. Los ladrillos fundamentales estaban allí, precocinados, como quien dice, sin necesidad de acudir directamente al CO_2 y H_2O para fabricarlos. La oportunidad era muy grande y el salto en eficiencia también. Así que no es de extrañar que algunas bacterias aprovecharan esta

nutricional “basura”: se había rediseñado el heterotrofismo, ahora ya perfecto. No obstante, las formas de obtener la energía debían ser las ya conocidas a partir de la de los enlaces químicos mediante un proceso de fermentación en aquel mundo sin oxígeno.

Al irse aclarando la atmósfera e ir disponiendo progresivamente de más energía lumínica, algunos autótrofos se especializaron en utilizarla como fuente de energía con un mayor rendimiento, aunque sin apoyarse aún en el oxígeno. Bacterias similares a las púrpura y verdes del azufre, con sus dobles membranas fosfolipídicas rodeando a una tercera interior de tipo proteínico, habían descubierto la **fotosíntesis anoxigénica** mediante la incorporación en su ciclo metabólico de una nueva molécula inteligente, la *porfirina*. Esta molécula tiene una estructura fundamental en forma de un anillo complejo de carbonos y nitrógenos, a la que inicialmente se le adosó en su posición central un átomo de magnesio. Posiblemente todo ello sucedió hace más de 3.500 millones de años. Podemos afirmarlo gracias al análisis de unos tapetes microbianos fósiles encontrados en el cinturón Barberton Greenstone sudafricano, datados en más de 3.300 millones de años, habiéndose llegado a la conclusión de que la fotosíntesis ya existía al menos en aquella época.



Molécula de la clorofila, cuya precursora, la porfirina, abrió el camino a la fotosíntesis (Wikimedia, dominio público)

Después de este período de evolución anaeróbica en un mundo marino protegido de los rayos ultravioletas, se produjo lo que el zoólogo anglo-canadiense Tom Cavalier-Smith considera la primera gran revolución de las bacterias. La fotosíntesis evolucionó en el antepasado común de todas ellas hacia su forma oxigénica al colaborar con el agua para obtener energía, abriendo así el camino para olvidar los poco eficientes

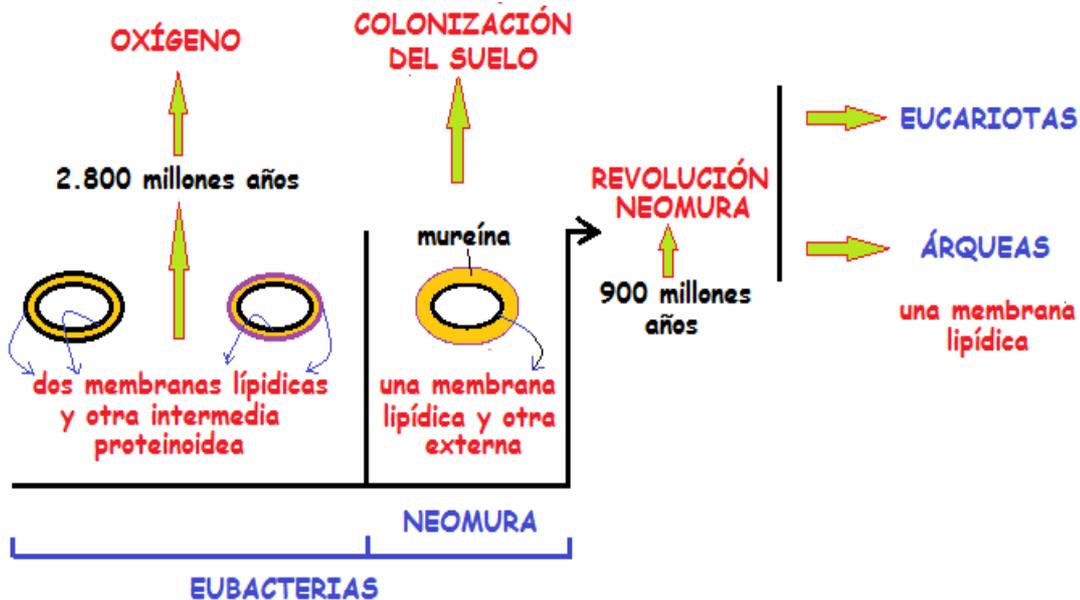
metabolismos anaeróbicos y dando paso a la supereficiente respiración aeróbica. Desde el punto de vista de la Evolución con mayúsculas, la novedad presentaba demasiadas ventajas como para despreciarla. En el camino dejaban un subproducto que revolucionó el mundo, **el oxígeno**.

Aunque sigue siendo objeto de muchos debates, los datos geológicos indican que este fundamental evento tuvo lugar en un momento temprano de la historia de la Tierra, en el entorno de hace al menos 2.450-2.320 millones de años. O posiblemente mucho antes, como lo afirma una publicación⁽¹⁰⁾ aparecida en 2015 en la que se justifica un adelanto de la frontera inferior de este evento hasta hace unos 3.200 millones de años. Poco a poco los organismos heterótrofos se introducían en el mundo aeróbico, **la era de las cianobacterias**, un mundo lleno de amenazas ya que el oxígeno era un veneno para las bacterias –es un elemento con gran reactividad que las oxidaba, robándoles valiosísimos electrones energéticos-. Pero a la vez un mundo lleno de posibilidades, más eficiente y a la larga más energético, que hizo viable una vida más activa, un mejor posicionamiento frente a las oportunidades y amenazas del medio ambiente, unas reacciones vitales más rápidas, lo que a fin de cuentas permitió unas posibilidades de evolución hacia estructuras más complejas e “inteligentes”.

Casi a la vez se hacía más complicada la química en la membrana exterior de las bacterias. Desaparecía la capa lipídica más exterior, mientras que la intermedia, que ahora quedaba en primera fila, se engrosaba al formar una intrincada red de un polímero llamado mureína, con lo que conseguían una gran resistencia estructural frente a las diferencias de concentraciones de proteínas entre el interior de la célula y el medio exterior. A este nuevo tipo de bacterias se le conoce como *neomuras*, que literalmente significa “pared nueva”.

La gran controversia actual es si las neomuras, como ancestros de las archaeas, son muy antiguas, ancladas casi en los orígenes de la vida (como hemos afirmado en capítulos anteriores), o bien son más “modernas”. La filogenia más actual parece que apuesta por esta segunda vía, que surge también de las teorías⁽¹¹⁾ de Cavalier-Smith, el cual opina que hace unos 900 millones de años las bacterias experimentaron su segunda gran revolución. El camino de las neomuras se ramificó en dos, el que llevaría a las archaeas y el propio de las eucariotas. Mientras las archaeas se adaptaron a ambientes calientes y ácidos, cambiando la proteína de su gruesa capa exterior, las eucariotas también adoptaron algunos cambios que a la postre les facilitó la motilidad y la fagocitosis. Pero ésta es otra

historia que contaremos con posterioridad. Y que deberá encajar con la antigüedad de más o menos 2.000 millones de años de lo que parecen ser los fósiles más antiguos de eucariotas.



Revoluciones bacterianas según Cavalier-Smith. Una, la generación de oxígeno, y la segunda, la aparición de las neomuras

Sabemos que la *crisis del oxígeno* tuvo su apogeo hace unos 2.400 millones de años, finalizando ya el eón Arcaico, con lo que culminaba el episodio de la gran oxidación. A partir de ahí el oxígeno de las cianobacterias quedó disponible para ser acumulado libremente en la biosfera. El porcentaje atmosférico de oxígeno, que hasta entonces permanecía contenido, comenzó su escalada. La Vida tuvo que reaccionar a esta amenaza, y realmente lo hizo con habilidad. Tuvo una ayuda colateral, ya que en las altas capas de la atmósfera la luz comenzó a catalizar una capa de ozono, O_3 , al disociar los dos átomos que componen el gas de oxígeno O_2 . Esta capa protegió la superficie de los mares favoreciendo la extensión del plancton superficial y, a la postre, la propagación de las bacterias. Tuvo que ser por tanto poco después, posiblemente en la frontera con el siguiente eón Proterozoico, mientras despegaba lentamente el oxígeno en la atmósfera, cuando se conquistó un nuevo avance en la eficiencia, aprovechando que el oxígeno generado en la fotosíntesis podía ser usado para incrementar notablemente el rendimiento energético del metabolismo. La **respiración aeróbica**, una de las más notables adaptaciones biológicas que sobre el planeta se ha dado, fue lo que permitió a los seres que la practicaron, unos 1.500 millones de años

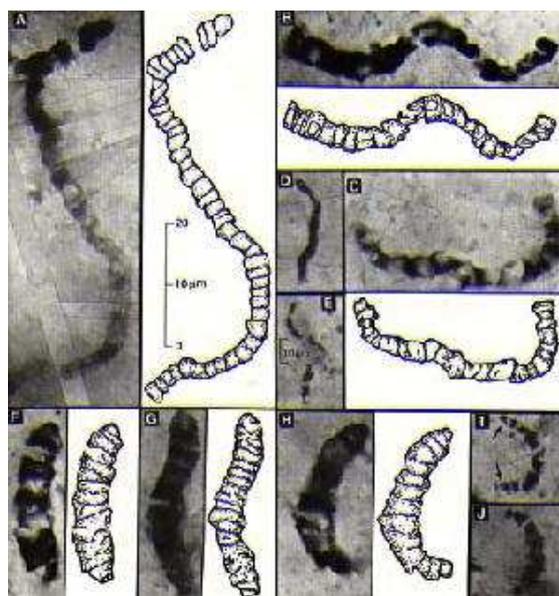
más tarde, iniciar una forma de vida más estable, compleja y especializada, como podemos apreciar en las actuales plantas y animales.

¿Fósiles?

Es casi imposible detectar fósiles de los seres arcaicos, dado que no disponían de partes duras. Sin embargo sí se puede saber de ellos a través de marcadores biológicos -compuestos químicos relacionados con sus procesos metabólicos- o mediante su influencia y las pistas dejadas en el medioambiente.

Comentamos ya en el primer capítulo, que correspondía a lo sucedido en el eón Hadeico, el hecho de que en las formaciones rocosas de Isua, en Groenlandia, datadas en hace unos 3.800 millones de años, se han encontrado claras evidencias de carbono de origen orgánico. También más arriba se ha mencionado los indicios encontrados en el cinturón sudafricano de Barberton Greenstone de lo que debieron ser los primeros organismos fotosintetizadores de hace 3.300 millones de años.

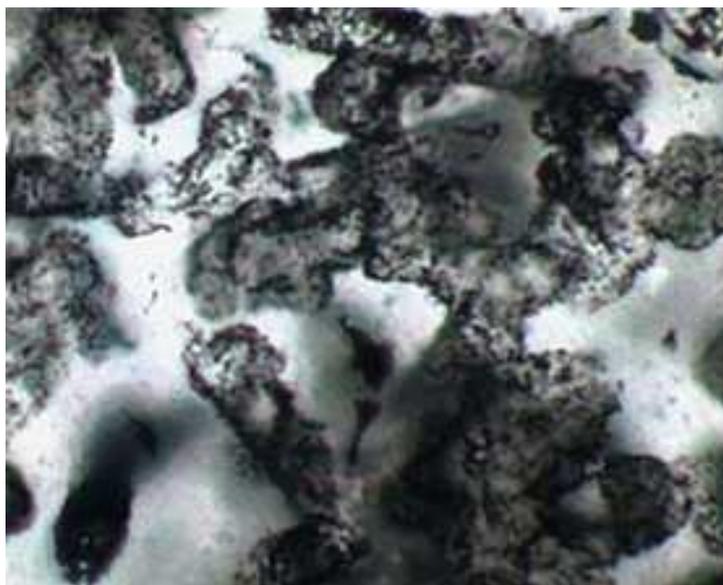
En 2013 se ha informado⁽¹²⁾ del doble descubrimiento en Australia y en Sudáfrica de lo que fueron tapetes microbianos. El primero es de hace 3.500 millones de años y el segundo de 2.900 millones de años. Evidentemente -por su difícil fosilización- no hay restos biológicos de los organismos que los construyeron pero su mera existencia permite conjeturar que en aquella época ya había vida.



Microfósiles de Marble Bar, Australia, de 3.500 millones de años de antigüedad (Imagen: Science, fair use)

En la imagen anterior podemos ver unas trazas halladas en algunas rocas de sílex de Australia occidental datadas en 3.500 millones de años de antigüedad, lo que parece ser se trataría del organismo vivo más ancestral -quizás algas verde-azuladas- del que se tendría una evidencia. No obstante *se ha especulado mucho acerca de si corresponden a un posible fósil de bacterias*. Un ejemplo de las dudas lo encontramos en esta⁽¹³⁾ publicación aparecida en 2015.

En 2011 se ha reportado, esta vez sí, una realidad. **La primera evidencia de fósiles** que datan de hace 3.400 millones de años, tratándose de bacterias que usaban el sulfuro en su metabolismo. Se han descubierto en una zona rocosa sedimentaria de cuarzo y arena conocida como Strelley Poll, en la región de Pilbara (recordemos de un anterior capítulo al antiguo cratón de Kaapvaal), al oeste de Australia. En el yacimiento los fósiles se encuentran junto a cristales de pirita que probablemente se tratan de subproductos del particular metabolismo de aquellos organismos que podemos ver en la figura siguiente.



Fósiles de bacterias datados en 3.400 millones de años, encontrados en las areniscas de la región de Pilbara, Australia (Nature, fair use)

En las rocas de la zona de Strelley Poll, donde se han encontrado los anteriores fósiles, son características unas formaciones rocosas llamadas estromatolitos. Es un nombre que viene del griego στρώμα, *strōma* “cama/alfombra” y λίθο, *litho* “piedra”. Son de especial significado en el estudio de la Vida ya que, conjuntamente con la liberación del oxígeno molecular, quizás el más trascendental de esta época, constituye uno de los biomarcadores más claros y abundantes. Sus estructuras se

pueden encontrar casi en cualquier momento de la cronología de todo el eón Arcaico, siendo especialmente comunes a finales del mismo.

Los estromatolitos son importantes formaciones fósiles que se comenzaron a formar hace 3.500 millones de años, con un máximo en su ubicuidad hace 1.250 millones de años, durante el Proterozoico. Posteriormente se redujo su abundancia y diversidad al aparecer organismos complejos que depredaban las bacterias que los construían, si bien actualmente continúan formándose en algunos lugares con aguas muy calientes y de alta salinidad, condiciones que protegen a sus cianobacterias. Los estromatolitos *más antiguos* que conservan *vestigios fósiles* de sus colonias bacterianas, datan de hace 2.700 millones de años.

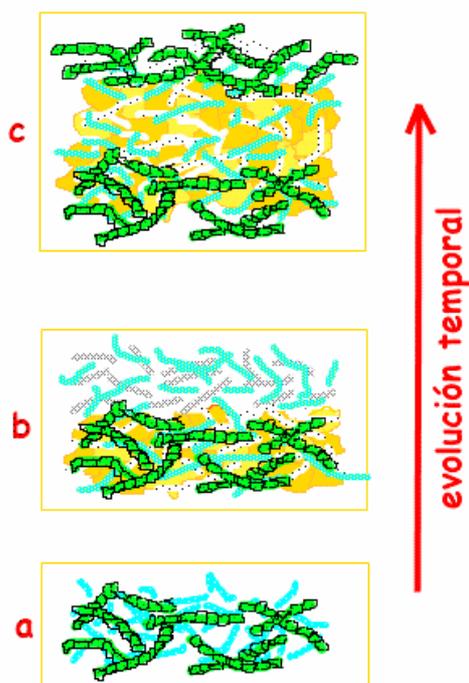


Estromatolitos modernos: formación en el mar (Wikimedia, GNU FDL 1.2) y corte (Wikimedia, dominio público)

Se conoce bastante bien en qué consisten estas formaciones rocosas gracias a los estromatolitos actuales. Se trata de estructuras estratificadas con un proceso de formación *sui géneris*. Imaginemos una zona de aguas someras y templadas en donde se asentó una colonia de bacterias formando un extenso y fino tapete. Vivían obteniendo la energía a partir de la luz solar y se alimentaban del CO₂ e hidrógeno del agua.

Con el paso del tiempo este tapete se fue cubriendo con los limos disueltos en el agua que se iban decantando sobre el fondo, y con los carbonatos que las propias cianobacterias generaban, capa sobre capa. La supervivencia obligaba a estirar la cabeza y asomar por encima de la ahogadora capa cálcica y de fangos, produciéndose una migración a través de la capa de carbonatos, por lo que se formaba sobre ella una nueva capa de bacterias vivas. Muchas de ellas morían, pero otras conseguían continuar el proceso emigrando a la superficie del casquete mineral. Con el tiempo estas

formaciones consiguieron construir estructuras incluso de varios cientos de metros de espesor. La presión de sus tremendos pesos las fosilizó.



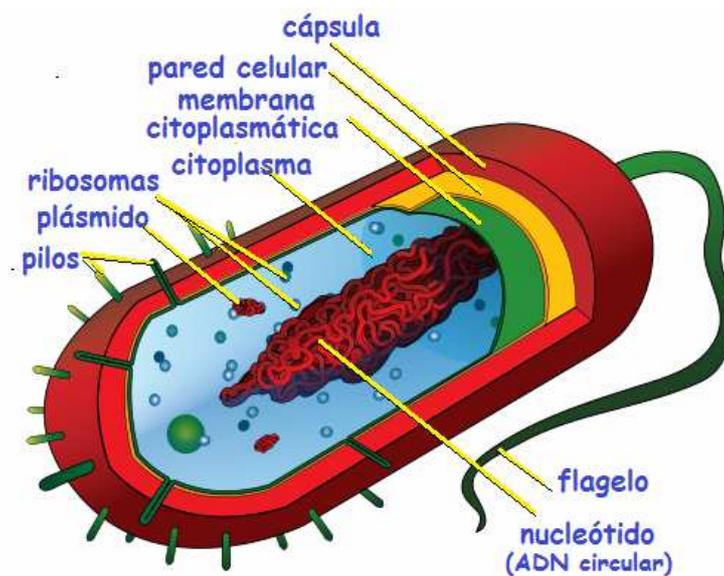
Proceso de formación de los estromatolitos: a. primera capa bacteriana; b. Crece la corteza de carbonato cálcico, las bacterias luchan por sobrepasarla; c. Aparece una nueva capa bacteriana sobre la corteza de carbonato cálcico

En la misma época en que constatamos las primeras evidencias de vida en los estromatolitos, hace unos 2.700-2.600 millones de años, aparecen también las primeras huellas de microorganismos viviendo en tierra firme, fuera de las aguas. Se trataría de **tapetes microbianos** de cianobacterias, y han sido encontrados en Sudáfrica.

Un merecido zoom sobre las bacterias

Hasta aquí hemos hablado mucho sobre las bacterias e incluso podemos imaginar que en aquellos años eran las reinas de la Tierra. Durante los millones de años del Arcaico habían ido modificando su forma de vida, a veces de forma progresiva y silenciosa, a veces a trompicones. Las podemos considerar un invento bastante perfecto a la vista de su ubicua expansión geográfica y de la vasta colonización de muy diversos nichos. La pequeña vacuola repleta de química había triunfado como unidad de vida: el microbio, la “vida pequeña” en sus dos vertientes de Eubacteria y Archaea.

Organismos unicelulares con un tamaño de unos pocos micrómetros (entre 0,5 y 5 μm , por lo general). En su interior, el material genético constituido por una molécula circular de ADN aún no estaba protegido por una membrana propia. Se cree que la selección debió favorecer la colaboración y unión de genes pequeños, e inicialmente independientes, formando una larga y única cadena. Desde un punto de vista de eficacia para la labor de genes que fueran complementarios, y prácticamente todos lo eran durante aquellos inicios en que aún no les había dado tiempo a evolucionar en demasía, era mejor que el “equipo de trabajo” estuviera unido en una única cadena y por tanto todos se replicaran a la vez. Ello prácticamente aseguraba el que en el futuro siguiera la colaboración, sin lugar a dudas con una probabilidad mayor que si cada uno se replicase por separado y con su propio reloj. Además, el hecho de compartir un mismo reloj de replicación eliminó la competencia entre ellos, entre los que lo hacían más deprisa frente a los que lo hacían más despacio. Así se piensa que se inició el avance evolutivo de la cadena del ADN, el ancestro del cromosoma.



Esquema de célula bacteriana (Wikimedia, dominio público)

Las pequeñas bacterias son organismos asexuales que se reproducen por división simple, siendo las hijas clones de la madre, de la que heredan copias idénticas de genes. Cuando sus membranas se fragmentan en dos se duplica también el ADN y se reparte el citoplasma y los orgánulos internos.

A pesar de que según lo anterior parece que siempre se mantendrá de generación en generación el paquete genético idéntico, esto no es así. Su ADN está sometido a cambios, unos por motivos azarosos al producirse

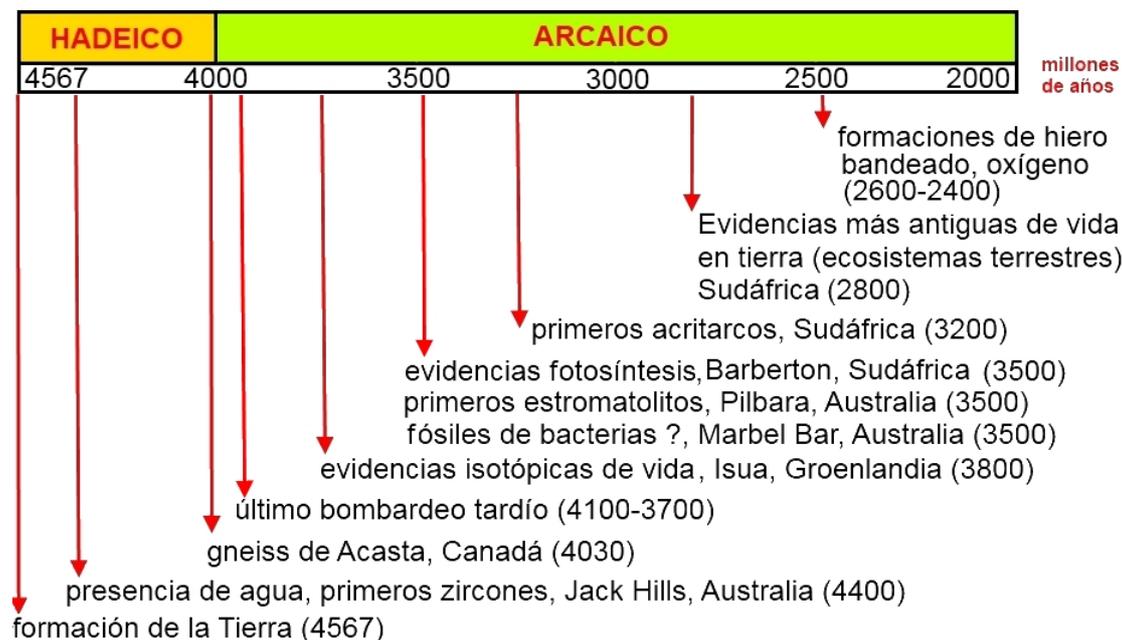
errores en el proceso de su duplicación o por la influencia de agentes mutagénicos, y otros al practicar una especie de sexo virtual cuando entre ellas mismas se da un intercambio de genes, proceso que es muy habitual y que se puede producir por contacto directo entre distintas bacterias o por transferencia a través del medio en que se encuentran. Todo un extenso menú de variaciones con el que consiguieron la diversificación tan extraordinaria que presentan.

Ya hemos comentado que los estudios filogenéticos moleculares han podido demostrar que existen dos familias principales, denominadas *Eubacteria* y *Archaeobacteria*. Aunque son bastante similares en forma y en tamaño, tienen una historia evolutiva independiente y presentan muchas diferencias en su bioquímica. Como ya hemos comentado más arriba, sus membranas están compuestas de diferentes fosfolípidos, así como lo son los polímeros que conforman sus cápsulas externas. Las archaeas poseen genes y varias rutas metabólicas que son más cercanas a las de los eucariotas, es decir son más “primas” nuestras, de los humanos, que las bacterias “auténticas”.

En aquella época ancestral ni unas ni otras debían ser muy distintas a sus tataranietas actuales, que constituyen el grupo de organismos más abundantes del planeta, con aproximadamente 22 filos (los filos son las grandes agrupaciones de los organismos vivos de acuerdo a sus planes generales de organización corporal). Son ubicuas, encontrándose en todos los hábitats terrestres y acuáticos. Crecen hasta en los lugares más extremos, como en los manantiales de aguas calientes y ácidas, en desechos radioactivos, o en las profundidades tanto del mar como de la corteza terrestre. Algunas bacterias pueden incluso sobrevivir en las condiciones tan opuestas a la vida como las del espacio exterior. A una bacteria se la puede congelar o desecar y mantenerla así por años con la seguridad de que “resucitará” cuando se vuelva a encontrar con condiciones propicias.

Y aquí siguen, entre nosotros. Aunque el número de especies apenas alcanza el 0,5% de todas las especies vivas descritas actualmente, su biomasa global sería equivalente a la de todos los vegetales que cubren el planeta. Se estima que en un gramo de tierra cohabitan en torno a 40 millones de células bacterianas y un millón de ellas en un mililitro de agua dulce. En total, se calcula que hay aproximadamente 5×10^{30} bacterias en el mundo. En el cuerpo humano hay aproximadamente diez veces más bacterias que células del cuerpo propiamente dicho, principalmente en la piel y en el tracto digestivo.

¡Todo un éxito el de las reinas del Arcaico! ¿No?



Esquema resumen de los principales hitos para la Vida durante el eón Arcaico

Se acaba este eón y el siguiente salto evolutivo en la biosfera se hará esperar unos millones de años. La Tierra era un hervidero de vida, muy activo en su elementalidad, donde los seres procariotas perfectamente adaptados a su medio ambiente no necesitaban más y tampoco aportaban más. Habría que permanecer con los dedos cruzados unos cientos de millones de años para que se diera un proceso simbiótico que desembocó en la célula eucariota, la célula con núcleo.

Mientras, la máquina geológica de la Tierra continuaba girando. La frontera con el Proterozoico no debió ser muy idílica. Un creciente vulcanismo afloraba nuevas masas de tierras que iban a seguir un rumbo gobernado ya por una decidida tectónica de placas. Los mares cálidos recibían cada vez más sedimentos de los florecientes continentes nuevos, mientras en sus aguas ligeramente ácidas se secuestraba al CO₂ en forma de carbonatos. En la atmósfera el oxígeno decía *¡aquí estoy yo!* amenazando la consistente Vida que con infinidad de trucos había llegado hasta estos años. Pero el proceso era ya imparable, pasase lo que pasase.

Su “misterio” se comenzará a desvelar durante el Proterozoico.

10. Abrimos las puertas del Proterozoico

En el capítulo anterior dejábamos a las bacterias atravesando la procelosa frontera entre los eones Arcaico y Proterozoico. No por ello lo hacía con paso titubeante ¡todo lo contrario! ¡Unos seres que llevan sobre el planeta unos 4.000 millones de años no tendrían nada de débiles ni de indecisos!

Y aquí los tenemos en el nuevo eón, el Proterozoico. Duró desde hace 2.500 millones de años hasta hace 542, un 45% de la vida de la Tierra. Su nombre viene del radical griego *protero-*, que da significado de anterior o antiguo, y de la palabra griega *zoicos*, vida.

Hasta el nacimiento de este eón, la Tierra se había ido preparando meticulosamente para llevar a cabo una larga y exitosa travesía. Se había apaciguado el torbellino energético de sus inicios y los abundantes cratones se encontraban preparados para comenzar su aventura continental. El oxígeno estaba iniciando su expansión en la atmósfera y la vida bullía en busca de nuevas formas y oportunidades. Todo llevaba un ritmo de crucero para comenzar el gran laboratorio del Proterozoico.

Por eso en este capítulo tenemos que hablar de cómo las humildes eubacterias recorrieron un camino de adquisición de habilidades, que a la postre les conducirían a formar organismos complejos multicelulares. Estas habilidades entran de lleno dentro del mundo de la Biología y para comprenderlas se va a hacer necesario el profundizar en algunas materias claramente teóricas, como la genética, la división celular o la herencia. No obstante me atrevo a asegurar el que es hartamente entretenido adentrarse en los vericuetos de estos temas por lo que siempre tienen de sorprendente.

En éste conoceremos el escenario, como hemos hecho al presentar a los eones anteriores, para finalizar introduciendo el gran avance de diseño en las formas de los organismos vivos: la célula procariota se transforma en la célula eucariota.

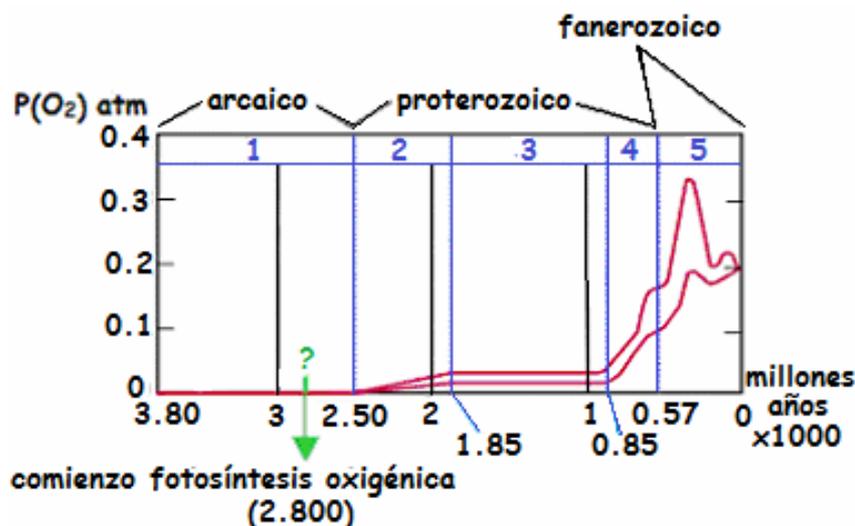
El oxígeno consigue aparecer en escena

Como ya se ha comentado con anterioridad, uno de los eventos más importantes del Proterozoico fue el aumento de la concentración de

oxígeno en la atmósfera de la Tierra. Las cianobacterias lo iban generando, y como ya no estaba sometido a las trampas de los minerales ferrosos, como sucedía durante el Arcaico, y puesto que los mares habían disuelto un porcentaje elevado de este gas, pasaba directamente a la atmósfera incrementando su población a lo largo de toda la era, de forma que a finales del Proterozoico -hace 540 millones de años- llegó a porcentajes semejantes a los actuales.

El incremento del oxígeno atmosférico fue determinante en los cambios climáticos subsiguientes.

Por su trascendencia y para una mejor comprensión de la evolución del O_2 en la atmósfera, se intercala la figura siguiente, en donde podemos apreciar cómo ha variado su contribución desde inicios del Arcaico hasta el día de hoy. La curva se da en unidades de presión parcial del mismo gas en el conjunto de la atmósfera, mientras que la escala temporal está en miles de millones de años.



Evolución del contenido atmosférico de oxígeno a lo largo de los últimos 3.800 millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

En el periodo 1 *no se acumuló oxígeno*, ya que el que se generaba era capturado oxidando el azufre y el hierro, al igual que se combinaba con el CH_4 para dar CO_2 , que era absorbido por los océanos y que luego pasaría a los organismos vivos. Poco a poco los *océanos y sus fondos rocosos absorbían el oxígeno* frenando así el ritmo de incorporación en la atmósfera; es el periodo 2. Pasamos al periodo 3 en el que el oxígeno había saturado el océano *pasando directamente a la atmósfera* en grandes cantidades, aunque su concentración se mantuvo limitada ya que aún debía

saturar las tierras emergidas y además iba siendo transformado por la radiación ultravioleta en la alta atmósfera dando lugar a la *formación de la capa de ozono*. A partir de hace unos 850 millones de años el oxígeno *se acumula en la atmósfera* hasta alcanzar el nivel actual (periodo 4).

El propio oxígeno cambió la composición de la atmósfera. Ayudado por la radiación ultravioleta barrió al amoníaco y al metano, que se transformaron en nitrógeno molecular y dióxido de carbono respectivamente, provocando con ello que nuestra atmósfera se aproximara a un patrón posiblemente muy parecido al de los planetas Marte o Venus. La amenaza fue conjugada en gran medida por las mismas cianobacterias que la habían producido, que permanecieron al quite del abundante CO₂ gracias a su laboriosa fotosíntesis. A ellas les debemos, pues, los hermosos colores azules de nuestro cielo y nuestro mar.

Además el oxígeno le prestó un buen empujón a la Vida. En aquellos momentos, y aún más que con respecto a ahora, dada la mayor cercanía del Sol, desde el exterior llegaba con gran intensidad la radiación ultravioleta de alta frecuencia, que a pesar de ser una de las fuentes energéticas más importantes para el planeta producía unos efectos dañinos en la Vida que pululaba por los mares sin poder asomar la cabeza dado el alto riesgo de quedar achicharrada. Como ya hemos comentado, gracias al oxígeno se formó la capa de ozono en los estratos altos de la atmósfera, a través de un proceso por el que, gracias al empujón energético de las radiaciones ultravioletas, se iban disgregando alguna de las moléculas de oxígeno dejando un par de átomos superreactivos. Cada uno de ellos se unía rápidamente con un O₂ para dar una nueva combinación, materializada en una sola molécula de tres átomos, el O₃. El ozono de la estratosfera, a su vez, era capaz de absorber casi el 100% de la radiación que le llega. Todos estos procesos de absorción de radiaciones luminosas de alta frecuencia fueron equivalentes a la creación de un paraguas protector que permitió a la Vida poder abandonar el blindaje que proporcionaban las aguas, salir más tarde a tierra firme e iniciar así la expansión y la complejidad.

Y no podemos seguir adelante sin hablar de otro efecto beneficioso producido por la capa de ozono. Al filtrar en un porcentaje tan elevado a las radiaciones ultravioletas, éstas no llegaron en abundancia a la superficie de los mares. ¿Por qué fue esto tan importante? Porque antes del oxígeno, cuando sí llegaban con toda su intensidad, producían la rotura de las moléculas de agua de los océanos, desperdigándose sus componentes, oxígeno e hidrógeno, por la atmósfera. El oxígeno quedaba fijado al oxidar la tierra mientras que el ligero hidrógeno habría escapado al espacio.

Hubiera sido muy posible que la pérdida de agua fuera muy grande, por lo que, por un segundo motivo el oxígeno, o mejor dicho, el ozono, nos alejó de un futuro marciano.

Gracias al oxígeno la Vida pudo evolucionar hacia organismos más grandes, ya que el metabolismo que se apoyaba en él como último receptor de electrones en las cadenas de obtención de energía, lograba ser hasta diez veces más eficiente que cuando se apoyaba en otras moléculas. No en vano el oxígeno, tras el flúor, es el elemento con mayor poder oxidante. Ello supuso que en cada salto de la cadena trófica, de predado comido a predador comedor, el aprovechamiento del alimento pudiera ser diez veces superior. De esta manera, dada una cantidad determinada de nutrientes de base, su aprovechamiento podía alcanzar a un mayor número de organismos en la pirámide de la Vida, pudiendo estos acometer funciones cada vez más complejas apartándose cada vez más de la simplicidad bacteriana.

Pero dejemos el canto de alabanza a nuestro “padre” oxígeno y volvamos a la cotidianidad de los acontecimientos.

De los pequeños cratones a los megacontinentes

En aquellos momentos la litosfera estaba fragmentada en escudos que se movían flotando sobre materiales inferiores más densos. Se estaba consolidando por primera vez este fenómeno que ha durado hasta la actualidad: la tectónica de placas y consiguiente deriva continental. Durante este eón se produjo una acreción continental rápida y masiva, ciclos de supercontinentes, presentando una gran dinámica tanto de movilidad como de fragmentación y reagrupamiento. Eso hacía que durante los movimientos de acercamiento o separación, en los momentos en que las placas emergidas estuvieran relativamente cerca, fueran creándose plataformas continentales con espacios de aguas someras y cálidas, en donde la vida tenía que ser prolífica. De hecho la geología ofrece evidencias de plataformas continentales de hace 1.500 millones de años.

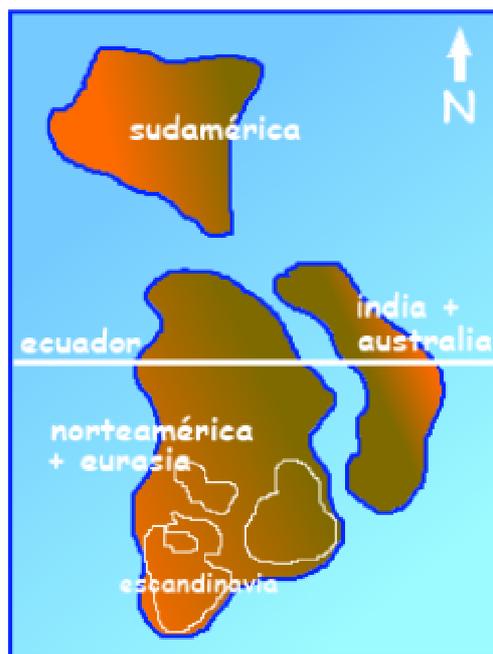
También debido a esto, en el Proterozoico se generaron muchos estratos que fueron depositados en los extensos mares epicontinentales de aguas superficiales. Por otro lado, en consonancia con el enfriamiento interno del planeta y la inherente “tranquilidad” geológica, las antiguas rocas magmáticas y depósitos sedimentarios de aguas profundas del Arcaico se fueron transformando, modificándose hacia estructuras que corresponden a

rocas metamórficas y sedimentarias: de las volcánicas komatitas y las formaciones de hierro bandeado del Arcaico se pasó a los carbonatos y cuarcitas del Proterozoico.

En la frontera entre el Arcaico y el Proterozoico los océanos que aún dominaban la superficie del planeta estaban siendo ocupados por el continente Kenorland que ya conocemos de un capítulo anterior. También hemos comentado que el incremento del oxígeno atmosférico facilitó la oxidación del metano. El resultado es que por cada molécula de CH₄ aparecía una de CO₂. Como este último, el dióxido de carbono, provoca un menor efecto invernadero que el primero, el metano, la Tierra entró en un periodo de intensas glaciaciones, cuyo principal exponente fue la glaciación Huroniana de hace unos 2.300 millones de años. No se sabe muy bien qué es lo que pudo desencadenar los acontecimientos que llevaron a su fin, pero posiblemente fue un nuevo episodio generalizado de vulcanismo.

Los cratones que salieron de la glaciación eran tremendamente activos e iban formando ya lo que podríamos llamar grandes continentes, los que iban a conformar los actuales por deriva sobre el magma. El continente Atlántica que consolidaba lo que hoy es el este de Sudamérica con el oeste africano, se estabilizó en el entorno de hace 2.100 millones de años. Un poco más tarde (hace unos 1.800 millones de años), en el norte hacía lo mismo el continente Nena (acrónimo de Norte de Europa Norte de América).

En sus derivas se daban épocas de unión, con grandes océanos y mares internos someros, y épocas de dispersión. Las colisiones continentales originaron importantes orogenias (formación de montañas). Era el preludeo de los futuros supercontinentes, aquellos que llegaron a reunir a todas las tierras emergidas de su momento, factor que, como veremos más tarde, condicionó en gran medida la climatología de la Tierra y la evolución de la Vida. Parece casi imposible imaginar, viéndolo desde hoy en día, cómo podemos estar seguros de estos movimientos geodinámicos. Pero un simple análisis geológico sobre distintos continentes hoy en día separados, evidencia en ellos un claro *alineamiento de las cadenas montañosas* que surgieron como consecuencia de aquellos plegamientos; como también lo evidencia la coincidencia de *estratos geológicos similares* en estas zonas. También los *datos paleomagnéticos* -resultado de la deriva magnética de los minerales magmáticos solidificados en el momento de la orogenia- permiten asegurar que en aquellos tiempos se pudo producir la reunión de la mayoría de los continentes en un supercontinente.



Posible distribución de tierras durante el continente de Columbia

Posiblemente el primero de ellos fue Columbia, que existió hace entre 1.800 y 1.500 millones de años. Su tamaño se compara al del futuro Pangea, madre de los continentes actuales. Se estima que tendría cerca de 12.900 kilómetros de norte a sur, y cerca de 4.800 kilómetros en su parte más ancha. Según el geólogo John Rogers, de la universidad de Carolina del Norte en Estados Unidos, la costa este de la India estaba unida a Australia y a su vez con Norteamérica y Canadá. La mayor parte de Sudamérica estaba girada al revés de manera que su borde occidental -actualmente la costa pacífica- se alineó con el este de América del Norte, formando un margen continental que se extendía hasta el sur de Escandinavia.

Con posterioridad, hace 1.100 millones de años, se llegó a formar el súper continente Rodinia, resultado de la fragmentación de Columbia -debido a una época de gran actividad volcánica- y que a su vez se disgregó unos 350 millones de años después. Las grandes tensiones en el choque y subducción de placas durante el proceso de su formación generó la orogenia de Grenville, de hace unos 1.100 millones de años, observable a la vez en diversas y separadas regiones de la geografía actual. El supercontinente Rodinia se comenzó a desmembrar hace unos 750 millones de años. En el mapa siguiente se puede ver la disposición de este continente cuando era una masa de tierra distribuida a través del ecuador, así como las zonas donde se dio la orogenia de Grenville, con la posición que ocupaban entonces las actuales masas continentales.



Rodinia con la simulación de las tierras actuales

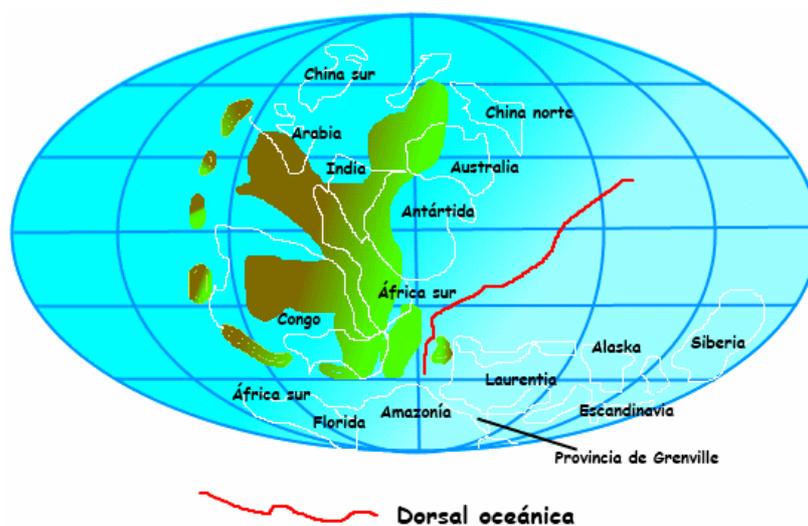
“Tierra bola de nieve”

Por el estudio de los sedimentos de Rodinia, de cuando este continente estaba iniciando su proceso de disgregación, se cree que en esta época se produjo un periodo de intensa glaciación -hace unos 710 millones de años-, durante el cual casi toda la Tierra estuvo cubierta por grandes masas de hielo, alcanzándose temperaturas medias de -50°C . Duró al menos unos diez millones de años. La Tierra surcaría entonces el espacio como una gran bola blanca de hielo, de ahí su evocador nombre: al periodo se le conoce como “*Tierra bola de nieve*”. Hay evidencias geológicas de una nueva glaciación 75 millones de años después, en las que los glaciares llegaron a ocupar posiciones ecuatoriales.

¿Cuáles pudieron ser las causas? El incremento del oxígeno atmosférico, como ya hemos comentado, indujo una desviación del contenido atmosférico de metano a dióxido de carbono, con la consiguiente debilitación del efecto invernadero y la caída de las temperaturas. La disposición espacial de Rodinia, que formaba un vastísimo territorio en posición ecuatorial, hacía que la mayoría de las tierras no disfrutaran del efecto moderador de temperaturas que ejerce el océano. La consecuencia de ello fue que las regiones internas de tierra, a excepción de la franja tropical, tuvieran un clima continental extremadamente seco debido a la falta de precipitación y a la vez extremadamente frío. Los continentes

tropicales, además, reflejan mucha más luz solar que los océanos por lo que la reunión de las tierras en una única masa sobre el ecuador habría aumentado el albedo -la capacidad reflectante- en el planeta. Todo ello pudo haber iniciado el proceso de glaciación que se fue realimentando a medida que la cantidad de nieve y hielo aumentaba sobre la superficie, circunstancia que a su vez volvía a incrementar el albedo, reforzando la situación de glaciación.

Se cree que la salida de este episodio se debió, paradójicamente, a la propia situación de bola de nieve unida a la actividad volcánica que en aquellos momentos, en que Rodinia se iba disgregando, debió ser importante. La capa de hielo sobre los océanos y las tierras había roto el ciclo del carbono impidiendo que el CO₂ fuera capturado por los mecanismos habituales en los que participa de forma importante la meteorización de las rocas y la recaptura en forma de minerales carbonatados en el fondo del mar. Todo ello unido, emisiones volcánicas y menor efecto sumidero, hizo que el dióxido de carbono fuera incrementando paulatinamente su participación en la atmósfera lo que impulsó un crecimiento progresivo del efecto invernadero, que a la fin provocó la fusión de los hielos superficiales. Se pasó en las temperaturas medias del planeta de los -50°C a los +50°C.



PROTEROZOICO TARDÍO 650 MM AA

Panotia con simulación de las tierras actuales. Comparando con el mapa anterior de Rodinia podemos ver la intensidad de las derivas continentales a lo largo de unos 350 millones de años.

Los restos de Rodinia se volvieron a reagrupar formando a Panotia hace 650 millones de años. Este nuevo supercontinente ocupaba una posición norte-sur, desde latitudes próximas a los 50° norte hasta el Polo Sur. Hacia

el final del Proterozoico, sólo unos 60 millones de años después de haberse formado, comenzó su disgregación.

La Vida

Éste era el escenario en donde la vida que venía del Arcaico encontró la presión y los incentivos necesarios para su evolución hacia morfologías y funcionalidades más variadas y competitivas, dentro de un nuevo entorno cada vez más agresivo debido al incremento del oxígeno en la atmósfera.

Al comienzo del Proterozoico las bacterias eran las reinas de la Tierra. Habían ocupado todos los posibles nichos ecológicos de los mares. El agua era necesaria para la vida, aunque también habían desarrollado múltiples estrategias de supervivencia, aprovechando cualquier oportunidad que la química les ofrecía para modelar variados caminos metabólicos. Un mismo patrón fenotípico y biológico se adaptó a la infinita variedad de la naturaleza marina y a las condiciones de su frontera con la atmósfera.

Al final de los casi 2.000 millones de años que duró el Proterozoico seguían ellas, microscópicas e invisibles, dominando la biosfera. Sin embargo, no permanecieron estancadas: se había abierto una ventana hacia la complejidad.

De los ocho hitos de la evolución de la Vida planteados por los reconocidos biólogos y genetistas John Maynard y Eörs Szathmàry, durante este eón se llevaron a cabo tres: El paso de la célula *procariota* a la *eucariota*, la aparición de la *reproducción sexual* y el inicio de los *organismos multicelulares*.

Nada mejor como colofón de este capítulo que las propias palabras de Maynard y Szathmary, de su libro “*Ocho hitos de la evolución. Del origen de la Vida*”:

“Aunque hemos dicho que el origen de las eucariotas es una de las mayores transiciones, realmente fue una cadena de sucesos: la pérdida de la rigidez de la membrana celular, la adquisición de la habilidad de alimentarse de partículas sólidas; el origen de un citoesqueleto interno y de nuevos métodos de locomoción de las células, la aparición de un nuevo sistema de membranas intracelulares, incluyendo la del núcleo; la separación espacial de los procesos de transcripción y de traducción; la evolución del material genético hacia cromosomas con forma de bastón y múltiples puntos en donde se puede iniciar la replicación, con lo que se eliminaban serias limitaciones para el crecimiento del genoma; y

finalmente el origen de los organelos de la célula, en particular la mitocondria y, en algas y plantas, los plástidos. De estos avances, al menos los dos últimos los tenemos que calificar como grandes transiciones en el sentido que representan grandes cambios en la manera en la que la información genética se almacena y trasmite”.

Esto es lo que vamos a ver a partir de ahora. En los capítulos siguientes vamos a analizar cómo se fueron produciendo cada uno de los avances en la morfología y en las relaciones entre los organismos que habitaron el Proterozoico.

11. Aparecen las células eucariotas

A estas alturas de la narración nos encontramos en pleno Proterozoico, un largo periodo que fue desde hace 2.500 a 542 millones de años. En el capítulo anterior dejamos listo el escenario dando un avance de la vida privada de sus habitantes, las bacterias procariotas. Ahora nos toca progresar estudiando cómo evolucionó su morfología hasta la célula eucariota, con núcleo interno, para en otras entradas posteriores profundizar en las habilidades que permitieron tal avance.

De célula procariota a eucariota

La revolución se produjo más o menos en el entorno de hace unos...

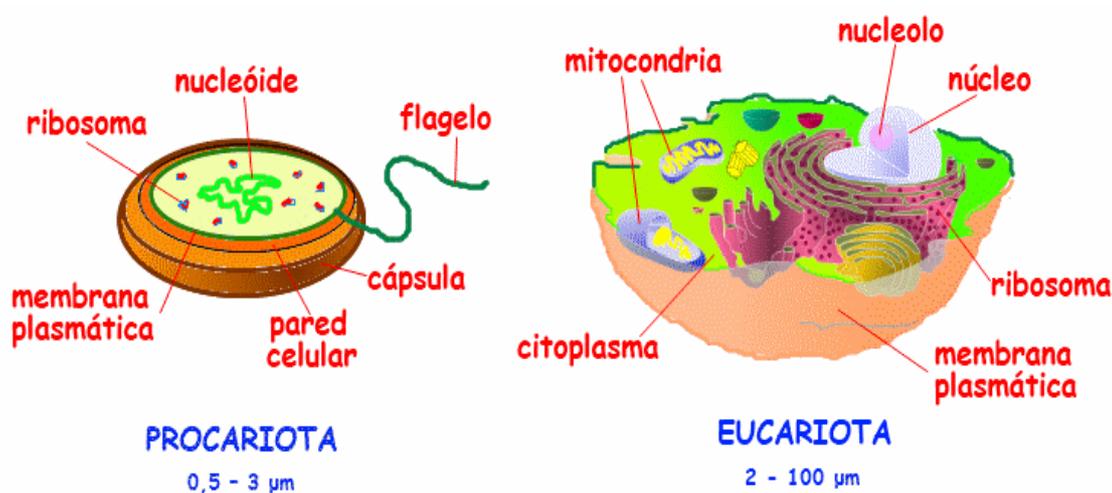
Realmente no hay una opinión común sobre cuándo se originaron las células eucariotas. Si atendemos a las posibles evidencias fósiles nos deberíamos remontar a hace más de 2.000 millones de años, como comentamos después en este capítulo, aunque hay algunos investigadores - Cavalier-Smith con su revolución neomura, capítulo 9-, que lo atrasan hasta hace sólo 900 millones de años.

Sea cuando fuera, se produjo una revolución al producirse un nuevo cambio en la química de las envolturas exteriores celulares. Lo que supuso un trascendental avance: algunas bacterias *flexibilizaron sus membranas exteriores* añadiendo en ellas glicoproteínas, unas moléculas estructurales formadas por proteínas y glúcidos. Con ello **ganaban elasticidad**, circunstancia que supieron aprovechar sus descendientes las eucariotas adoptándola para sus necesidades de alimentación y movimiento.

No obstante, la pérdida de rigidez de su membrana externa podía representar una desventaja, ya que suponía un punto de fragilidad como consecuencia de la disminución de resistencia frente a la presión hidrostática de su interior. Pero lo compensaron creando un *citoesqueleto interno* que les proporcionó no sólo resistencia estática sino también versatilidad dinámica al poderse deformar, lo que suponían unas novedades bastantes ventajosas para su subsistencia. El citoesqueleto, o al menos sus bases iniciales, no debió ser un invento original de las eucariotas, ya que también las procariotas disponían de las dos principales

proteínas que forman su estructura, la actina y la tubulina. Esta circunstancia deja la duda de si el citoesqueleto pudo ser desarrollado directamente por la propia eucariota o quizás haber evolucionado en una célula procariota ancestral, que con posterioridad habría entrado en el interior del citoplasma de la eucariota, manteniendo ambas una relación de simbiosis.

Resulta significativo el hecho de que la actina es una de las dos proteínas directamente implicadas en la motilidad de los músculos. Una prueba más que refuerza la idea de la existencia de antepasados comunes entre animales y procariotas.



Una sencilla comparación entre la célula procariota y la eucariota, esta última con la complejidad de sus múltiples orgánulos (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Al ser la membrana de la eucariota más flexible y tener capacidad dinámica para modificar su forma, disponía también de una teórica aptitud mediante la que podía en algún punto invaginarla hacia dentro del citoplasma, como quien le da la vuelta a un calcetín. En algún momento esta habilidad le permitió “tragarse” una cierta cantidad de materia prima que era útil para su metabolismo y crecimiento. Siempre se había “alimentado” gracias a la permeabilidad de su membrana celular, pero al ser el nuevo proceso también eficaz y competitivo, la selección natural protegió a los organismos que lo adoptaron. Como resultado de las fagocitosis, que es como se llama este mecanismo, dentro del citoplasma empezaron a quedarse vacuolas aisladas por membranas de estructura similar a la celular, vacuolas que comenzaron a multiplicarse y relacionarse, colaborando entre ellas, fusionándose y creando **nuevas organizaciones membranosas internas** con una variada e importante

funcionalidad. No nos olvidemos que en ellas se encuentra la factoría energética de la célula, vía la generación del ATP.

La eucariota disponía también de un nuevo elemento, el **núcleo**, separado del propio citoplasma por una de estas membranas internas. El núcleo es el puesto de mando de la célula eucariota, en donde está empaquetada la información genética en forma de cromosomas. Fuera del núcleo, en el citoplasma, además de las membranas derivadas de la citoplasmática exterior se encuentran abundantes vesículas y el mencionado esqueleto interno, muy dinámico, en el que encuentra un soporte estructural y con el que la célula podía realizar un amplio abanico de nuevos “trucos”: rigidez a la par de plasticidad, cambiar de forma y moverse, y nuevas estrategias para su alimentación y reproducción. Uno de los principales orgánulos internos era la *mitocondria*, personaje que ya ha salido en esta historia, auténtica fábrica de energía, de las que puede haber hasta 100.000 en una sola célula. Hay otros, como los ribosomas o el aparato de Golgi que son elementos fundamentales en la gestión de las nuevas proteínas. Y qué decir de los cloroplastos de las células vegetales auténticas placas fotovoltaicas en donde se realiza la fotosíntesis. A vista de pájaro podemos imaginar a las células eucariotas como un mórbido globo gelatinoso de forma mutante, pero con una intensa vida propia.

Con ellas se abrió la posibilidad de la reproducción sexuada y la herencia de los caracteres paternos. De todo ello hablaremos más tarde, a lo largo de capítulos posteriores.

Sin embargo, vistas las características que diferencian a la célula eucariota de la procariota, surgen un sinfín de preguntas que no se reducen solamente a querer saber cómo aparece el núcleo celular -circunstancia que parece ser el estereotipo del cambio entre ambas-.

Ya hemos hablado de cómo se perdió la membrana exterior. En el párrafo siguiente comentaremos cómo se incrementó la superficie de membranas internas disponibles para su metabolismo y cómo se consiguieron los *orgánulos citoplasmáticos*. Continuaremos en capítulos siguientes analizando cómo se pasó de un cromosoma circular procariota a cromosomas lineales y cómo con posterioridad se duplicó la carga genética hasta dos juegos de cromosomas equivalentes. Comentaremos también el porqué del triunfo de la transmisión de la herencia vía fusión de dos células haploides (las que tienen un solo juego de cromosomas); por qué fue seleccionado el éxito del proceso reproductivo a través de la meiosis -en el que se generan las células sexuales- y el porqué de hacerlo a través una

doble meiosis. Intentaremos aclarar también la aparente paradoja de por qué hay dos tipos de gametos, masculino y femenino, y además diferenciados en su tamaño.

Los primeros pasos hacia los nuevos orgánulos del citoplasma

Comenzaremos por explicar cómo aparecieron los nuevos corpúsculos citoplasmáticos, incluido el nuevo núcleo. La teoría mejor aceptada en el mundo de la biología, hoy por hoy, es la que explica la historia de los progresivos cambios desde la célula procariota a la eucariota mediante una serie de endosimbiosis, por las que sus orgánulos adicionales serían descendientes de procariotas que colonizaron el citoplasma de una célula “protoeucariota” al ser fagocitados. Esta teoría, aunque se originó en el siglo XIX, fue replanteada por el biólogo ruso K. Mereschkowsky en 1910 y defendida definitivamente en toda su extensión por la prestigiosa bióloga norteamericana Lynn Margulis en 1967.

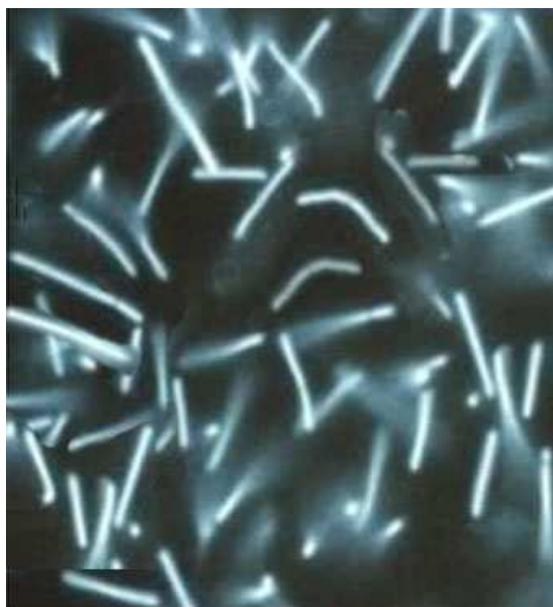
Todo se basa en que las mitocondrias -las fábricas energéticas- y los plastos -los centros de la fotosíntesis y grandes almacenes de materiales necesarios para el metabolismo- de las células eucariotas se parecen mucho a seres unicelulares procariotas. Ambos orgánulos, *diferentes al núcleo, contienen también su propia carga de ADN*. Además, su estructura, el ARN que generan y las proteínas y enzimas que expresan son más parecidas a las de las bacterias que a las de las células eucariotas.

La simbiosis entre estas antiguas células debió ser el resultado de un proceso de aproximaciones sucesivas, posiblemente consecuencia de un medio ambiente competitivo. Quizás todo pudo empezar con la formación de una protoeucariota, según la plausible explicación que en 1998 dieron los profesores William Martin y Miklós Müller, conocida como la *teoría del hidrógeno*. Vamos a rastrear lo que dice esta teoría.

Este modelo da explicación a los curiosos parecidos entre los aparatos genéticos, y también de algunas enzimas, *de las arqueas y las eucariotas*, así como los que se dan también *entre eubacterias y eucariotas* en los procesos de generación de lípidos y de gestión energética de sus metabolismos. Son pistas de partida que permiten considerar a la “fusión simbiótica” de bacterias como el paso precursor de la aparición de mitocondrias y plastos en las eucariotas.

En aquel mundo del Proterozoico nos es fácil figurar la infinitud de encuentros que debían producirse entre sus habitantes. Podemos imaginar a

una primitiva y “voluminosa” arqueobacteria quimioautótrofa, cuando en un día de escaseces se encontró con una pequeña eubacteria fermentadora.



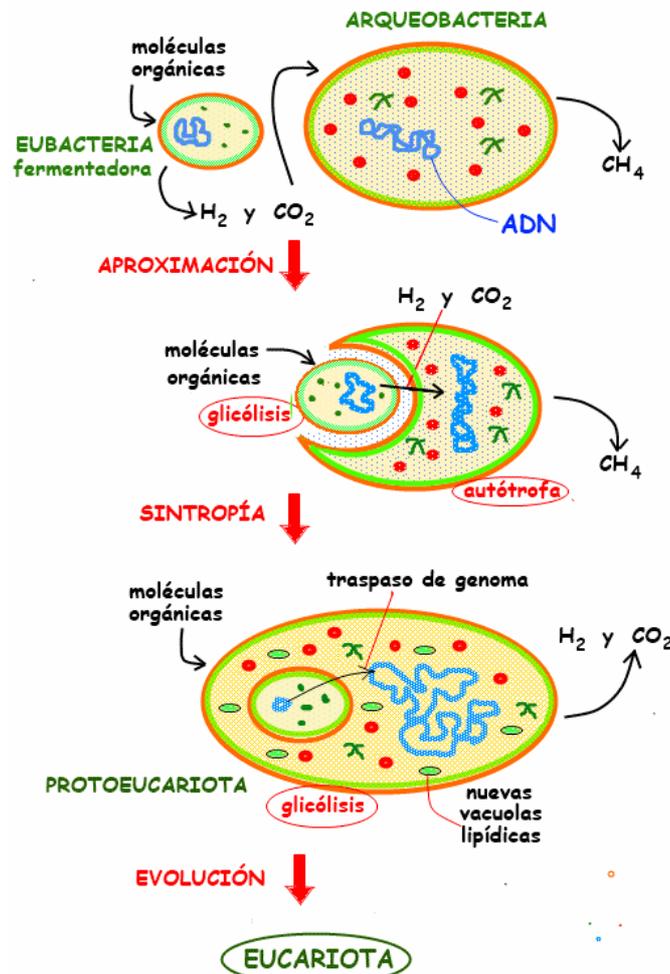
La arquea metanógena Halobacteria, cada célula mide aproximadamente 5 μm de longitud (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Ya sabemos que la primera, la arquea, obtenía la energía que necesitaba para su vida a través de un proceso anaeróbico que dependía del hidrógeno. Bien pudiera ser una bacteria metanógena que se escondía del eventual y tóxico oxígeno que iba apareciendo sobre la Tierra, chapoteando en un lodazal u oculta en las profundidades de los mares, sin más movilidad que la que le inducía el medio en donde estaba inmersa.

No podía aumentar mucho su tamaño pues la energía la sintetizaba en su pequeña membrana y por tanto no disponía de mucha. Ya sabemos que en las membranas celulares es donde se fabrican las “píldoras” del energético ATP. Y la suya daba para lo que daba. Si aumentaba su volumen, sus necesidades metabólicas aumentaban con el *cubo* de su crecimiento, mientras que su membrana, su fábrica de energía, aumentaba con el *cuadrado*. Las cosas eran así de simples, de forma que en su normal desarrollo no tardaba mucho en llegar a su madurez, y se dividía y se dividía a toda velocidad, sin crecer desmesuradamente de tamaño.

Por el contrario, la diminuta fermentadora obtenía su energía de compuestos químicos orgánicos sin necesidad de usar el oxígeno. Había visto que en la gran arqueobacteria había alimento y se acercó. Poco a poco comprobaron que los materiales excretados por la fermentadora, entre otros

H_2 y CO_2 , debían ser complementarios de los que necesitaba la gran arqueobacteria. La alternativa de acoplar sus procesos podía ser viable y por ello la experiencia no fue vetada por la selección natural. Se unieron, pues, entrando la pequeña y habilidosa comedora de glucosa en el citoplasma de la grande y dependiente arqueobacteria.



Modelo de Martin y Müller sobre el origen de las eucariotas, 1998 (a partir de "On the origin of cells", Martin y Russell)

La nueva realidad supuso la suma de dos membranas y, por tanto, un incremento de la superficie en donde se generaba el ATP, la energía vital para el perfecto funcionamiento y la posibilidad de desarrollo y crecimiento del conjunto. Pero surgió un problema ya que la pequeña bacteria fermentadora debía alimentarse a sí misma y a la vez a su huésped; mucho metabolismo para tan frágil organismo! La cosa se solucionó mediante un "acuerdo" entre interesados: una oportuna mutación *duplicó parte del genoma de la fermentadora, copia que cedió a la gran arqueobacteria*. Esta lo incorporó a su anillo de ADN aprendiendo así a

“digerir” la materia orgánica por sus propios medios, siguiendo el mismo método con que lo hacía la fermentadora. Eran los mismos genes los que dirigían la función.

Pero, además, la cesión de parte del genoma de la hospedada a la hospedadora solucionaba otro problema. En un principio, antes de que esto hubiera ocurrido, la bacteria fermentadora metabolizaba mucho más rápidamente que la “gigantesca” arquea al ser la más pequeña del consorcio. Sus genes debían expresarse diez mil veces más rápidos que los de su “casera”, más estables y en consecuencia propensos a conservar más las mutaciones. Todo ello suponía una crisis tremenda cuando sus respectivos ribosomas, de la arquea o de la fermentadora, fabricaban la misma proteína desorientados sin saber a qué gen hacer caso, si al lento y no mutado o bien al rápido y mutado. Se trataba de un terrible problema de supervivencia que se resolvió con el traspaso de genomas de entre ambas bacterias.

La unión de ambas bacterias fue un acuerdo muy útil, ya que abrió la puerta para que la arquea se hiciera no con una, sino con cientos de fermentadoras: había resuelto su problema de tamaño y energía mediante la adición de membranas ajenas sintetizadoras de ATP. Y aún más: algunos de los genes trasvasados eran los que expresaban la síntesis de los fosfolípidos que formaban la membrana de la fermentadora ¡miel sobre hojuelas! como afirma el dicho popular. Una vez estos genes en la arquea, empezaron a hacer lo mismo, por lo que se produjo una sobrepoblación de lípidos en su citoplasma. Espontáneamente se agruparon en vacuolas, fueron creciendo y constituyeron las semillas de las múltiples membranas citoplasmáticas de las eucariotas, incluida la membrana nuclear.

Con el tiempo, y mientras los nuevos genomas de la arquea tomaban las funciones de los de las antiguas compañeras fermentadoras, estos últimos se hacían obsoletos desapareciendo parcialmente del aparato genético de la simbiote. De forma que hoy en día en el genoma eucariota se detectan dos tipos de genes, los “informativos” dedicados al tema de herencia que se parecen a los de las arqueas, mientras que los “operacionales” del metabolismo y la ontogenia se parecen más a los de las bacterias. En el proceso se había conquistado muchas habilidades y adquirido también algún que otro problema: las cadenas ADN conocidas como transposones. Venían de serie con el genoma de la fermentadora y eran expertos en hacer continuas e inútiles copias de sí mismos, dificultando los procesos normales de la asociación de simbiotes. Recordad a estos personajes pues hablaremos de ellos más adelante, sobre

todo al discutir la transmisión de la información de los genes a las cadenas proteínicas.

Y esta es la teoría sobre la aventura procariota que le llevó a procrear una eucariota. Veamos ahora como pudo ser la historia real.

La primera sociedad simbiótica

Resulta tremendamente complejo, sino imposible, el determinar cuál pudo ser la secuencia cronológica de este salto evolutivo celular. Los tiempos profundos del Proterozoico son eso, profundos, y es muy difícil obtener una base fósil completa que ayude a ello.

Podemos pensar que la simbiosis entre células, descrita en los párrafos anteriores, exigía una cierta habilidad fagocitadora al menos en una de ellas. Sabemos también que las membranas de las procariotas son bastante rígidas y que se requirió una revolución en sus proteínas para obtener la elasticidad necesaria. Gran dilema temporal que puede situarse entre lo que creemos los primeros fósiles de eucariotas -de hace 2.100 millones de años- hasta la revolución neomura -de la que hablábamos en el capítulo 9- de hace 900.



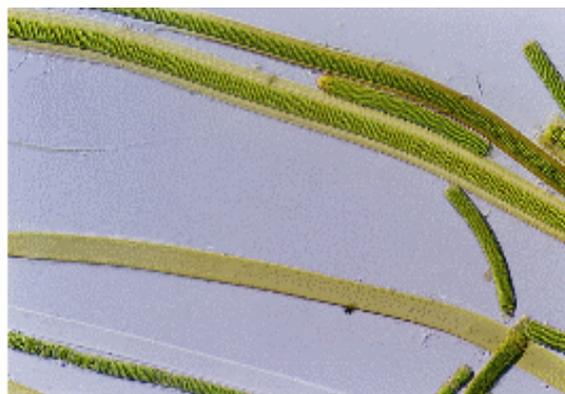
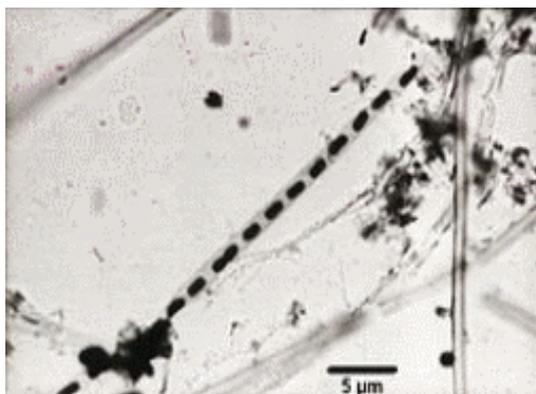
Espiroqueta Treponema pallidum (Wikimedia, dominio público)

El primer paso pudo ser el siguiente. Una espiroqueta, otro tipo de bacterias procariotas, con una habilidad exclusiva para desplazarse mediante un movimiento ondulante, lo que le facilitaba la búsqueda del alimento, se topó con nuestra procariota mutante, quién sabe si ya una eucariota con núcleo, y vio que tras su membrana había un mundo húmedo

y lleno de nutrientes de los que vivir. Comienza un ataque y prosigue con una larga pelea, hasta que aparece el punto de interés común que propicia la útil tregua. El resultado es que la espiroqueta se acercó en la eucariota mayor y le ayudó en su movilidad.

Nuevas compañeras inauguran un nuevo mundo

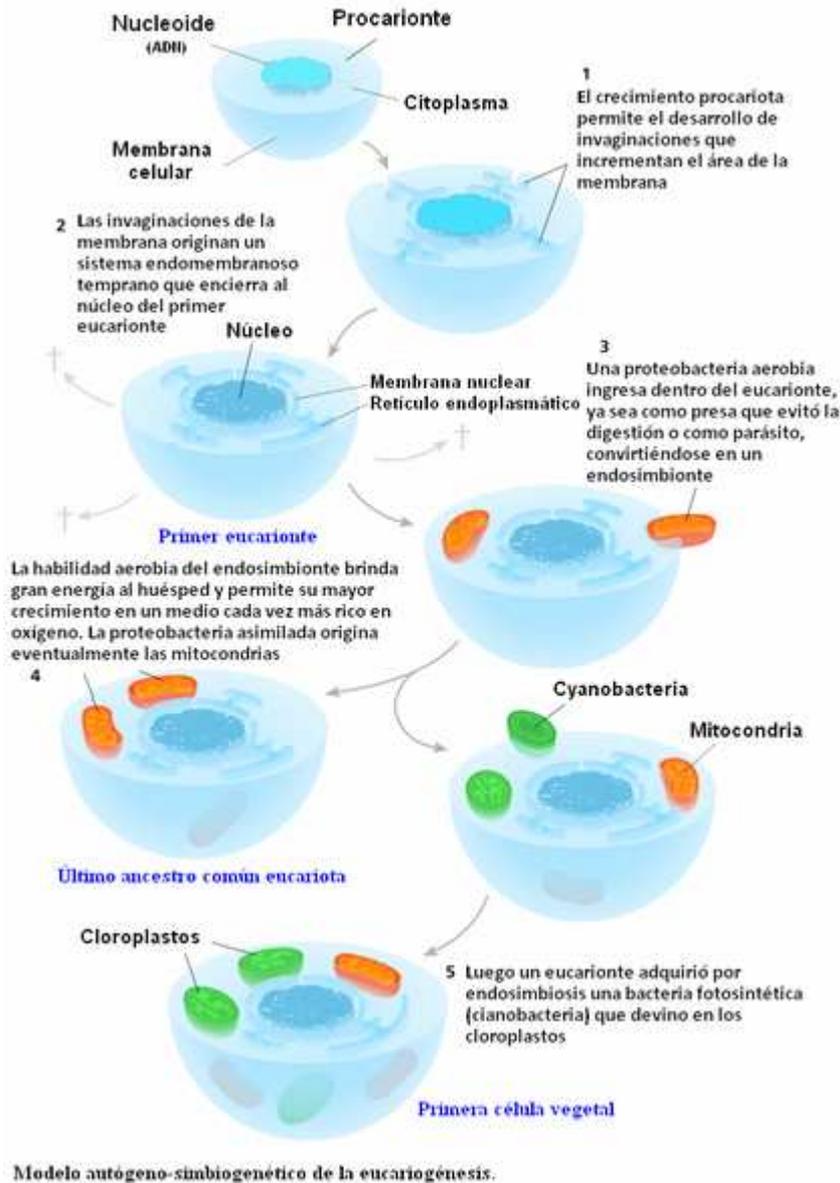
Los años pasaban sobre la Tierra y, como ya hemos comentado, el oxígeno empezó a apretar: la atmósfera se fue llenando de este gas venenoso. Y a nuestra protagonista, con sus espiroquetas, no le quedó más remedio si quería sobrevivir que pensar en un imposible. Pero los imposibles a veces se hacen probables o ciertos. En un cierto momento, junto a ella, pasó otro tipo de bacteria con su propio material genético y un rarito, en aquel momento, metabolismo ya que se llevaba muy bien con el nuevo gas asesino: una protobacteria respiradora aeróbica, posiblemente una bacteria púrpura como una de las actuales *Paracoccus*.



A la izquierda la bacteria púrpura Leptothrix (Wikimedia, CC By-SA 3.0) y a la derecha la cianobacteria Lyngbya (Wikimedia, dominio público)

Respirar oxígeno a nivel metabólico significa usar el oxígeno en el proceso de quema de carbohidratos, siguiendo el ciclo de Krebs introducido en el capítulo 8, y así tener un suministro de la energía necesaria para vivir. Se produjo una nueva simbiosis por la que ambos unicelulares aprendieron a defenderse juntos del oxígeno, uniéndolo a moléculas orgánicas y en forma de inofensivos CO_2 y H_2O . Con una ventaja adicional ya que por el camino se conseguía ATP de una forma más eficiente de lo que se solía practicar hasta entonces. Una vez más la solución se manifestó claramente viable y competitiva, por lo que una “quimera nadadora que respiraba” se abrió paso en la historia de la Evolución con mayúsculas.

De esta manera se habían introducido en el diseño de la Vida, casi sin permiso, **las mitocondrias**. Según comenta Lynn Margulis en su libro “*Planeta simbiótico*“, esto pudo suceder hace unos 1.000 millones de años.



Evolución simbiótica de las formas de vida a partir de las arqueas
(Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Más tarde se asoció otra bacteria con algunos de esos simbiotes, una verde cianobacteria que sabía fotosintetizar. Del tipo de las que estaba en aquellos momentos causando la hecatombe ecológica del cambio hacia un mundo aeróbico. Sería semejante a una actual cianobacteria *Synechococcus* que lo mismo vive en la superficie de los océanos formando parte del plancton, que vive disfrutando de lugares a 75°C. Se demostró también que

era una unión evolutivamente viable y prosperó el nuevo ser camino de las algas unicelulares y las plantas más complejas. Estas cianobacterias pasaron a ser los cloroplastos de las células vegetales.

Se estima⁽¹⁴⁾ que la aparición de los primeros plástidos en una célula eucariota se produjo hace unos 1.500 millones de años. Lo cual permitiría pensar que la fusión que inició las mitocondrias pudiera ser anterior a los 1.000 millones de años que apuntaba Margulis.

Tres simbiosis cambiaron el planeta: A excepción de la que se llevó a cabo con espiroquetas, de la que aún no se tienen evidencias claras, el resto de la teoría de Lynn Margulis sobre la simbiogénesis está fuertemente demostrada y aceptada por el mundo científico. Apoya al convencimiento el hecho de que la simbiosis es un tipo de asociación muy común en la biosfera actual. También es extremadamente revelador que el material genético de las bacterias respiradoras actuales, las que viven en la naturaleza de forma independiente, se asemeje muchísimo al propio material genético de las mitocondrias. Pasa lo mismo entre las actuales cianobacterias y los cloroplastos. Y lo que parece más significativo, en el interior del citoplasma las mitocondrias y cloroplastos se reproducen de forma independiente al proceso de división celular, como si tuvieran vida propia.

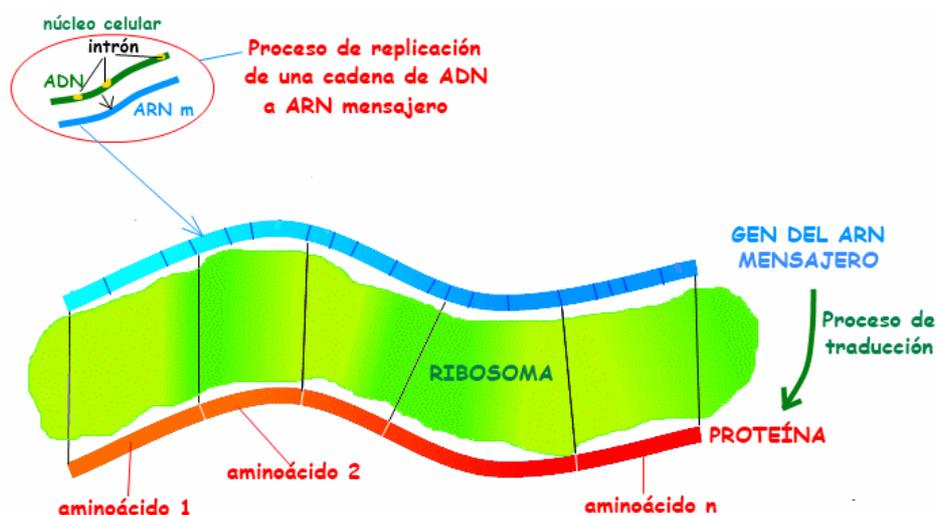
La aparición del núcleo eucariota

Quizás durante las constantes luchas inherentes a las simbiosis que se estaban produciendo, y como una estrategia de defensa, la gran arqueobacteria aisló su material genético con una membrana. O pudo ser que esto sucediera después de la fusión de los materiales genéticos de los simbioses. El resultado fue el núcleo celular en el que el ADN en anillo inicial se fue reestructurando y dividiendo, formando los cromosomas. Fue la gestación de la primera célula eucariota que ya nunca más fue una bacteria.

¿Cuál fue el motor de esta revolucionaria innovación? Seguramente fueron muchos y variados. En el proceso pudo influir la incremental presencia del oxígeno libre en el planeta, que iba ejerciendo una presión con matices selectivos, de forma que se hicieron viables aquellas bacterias que preservaron a su genoma de una oxidación destructiva aislándolo con una membrana.

Hay una teoría⁽¹⁵⁾ aún más elaborada, presentada por los biólogos William Martin y Eugene Koonin, que basa la creación del núcleo en circunstancias

diferentes a las provocadas por la abundancia del oxígeno. Más adelante, en el capítulo 13, profundizaremos en el conocimiento de los procesos de replicación del ADN, de genes, intrones y exones. Basta aquí saber de la existencia de los transposones, que se encuentran mezclados en la cadena de genes del ADN que expresan las proteínas: unos “tramposos” a los que se les llama intrones. Por estudios filogenéticos se ha podido determinar que provienen de un antiguo gen que se comportaba como un virus: entraba y salía en el ADN como quería. Una vez dentro, cuando en un ribosoma se estaba llevando a cabo el proceso de traducción de una cadena de ARN a proteínas, llegaba lógicamente un instante en que el turno de traducción era el de un intrón. En este momento la respuesta del intrón era semejante a la acción de unas tijeras, se separaba de la cadena de ARN, se independizaba y cortaba el proceso de generación de la proteína. Una vez libre se replicaba, siendo así que los gemelos acababan unidos al ADN en cualquier sitio. Algunos de estos genes saltarines fueron perdiendo su capacidad de independencia y se quedaron fijos en el ADN, *lo cual no era bueno para la bacteria ya que con ello creaba unas proteínas un tanto extrañas y fuera de su propósito.*



Traducción de la información del ARN mensajero en el ribosoma con el resultado de la síntesis de una proteína. En la figura se representa el proceso en una eucariota con núcleo. En una célula procariota el ribosoma está literalmente pegado al ADN.

En las primitivas bacterias intervinieron la evolución y su rápido metabolismo, consiguiendo expulsar a los intrones de las vidas de las procariotas. Cosa que no ha sucedido en las eucariotas, en las que quedaron vestigios residuales de estos genes saltarines ¿tendrán alguna relación estas

conflictivas secuencias de nucleótidos, los intrones, con la existencia del núcleo celular?

Ya sabemos que cuando se creó la quimera por simbiosis entre una fermentadora y una arquea, esta última se pudo encontrar con algunos intrones anarquistas de las fermentadoras. Al no existir aún el núcleo aislado el proceso de síntesis de las proteínas lo llevaban a cabo el ARN en los ribosomas literalmente pegados al ADN. El proceso era rápido y no lo podían seguir los intrones “inactivos”, mucho más lentos en su copiado y por tanto con un efecto tijera retardado. La velocidad de generación de la cadena de la proteína era superior a la velocidad con que los intrones pudieran haberse independizado de la cadena del ARN traductor. Las proteínas que se generaban en los ribosomas debían salir bastante defectuosas, incluso letales, con algunos aminoácidos extraños: todo un gran problema. De alguna forma había que **separar temporalmente** la corrección de los errores que provocaban los intrones *adelantando este proceso al de fabricación de proteínas*. Y lo mismo daba separación cronológica que espacial. Así que la arqueobacteria encontró una solución drástica al tema: creó una membrana porosa alrededor del ADN, una membrana que no tenía nada que ver con las típicas membranas celulares, mediante la que aislaba la acción tijera de los intrones -que a partir de entonces sucedía dentro del núcleo- del proceso de fabricación de proteínas, que se hacía fuera. Por los poros pasaba el ARN mensajero limpio a la búsqueda de los ribosomas que quedaron fuera fabricando las cadenas de aminoácidos.

¿Fue éste el camino por el que la selección protegió la membrana nuclear?

Pudo ser. Aunque lo significativo son los hechos. Al final de este complejo proceso la novedosa célula eucariota había heredado las habilidades adquiridas a partir de los miembros de los sucesivos consorcios. Había aumentado su capacidad energética, por lo que pudo moverse más y fagocitar. Con ello se le incrementaron las posibles vías de captura de alimentos. Ya no necesitaba un metabolismo rápido como el viento para buscarse la vida y reproducirse, le sobraba energía para actuar sin prisas. El truco de convivir con los intrones le permitió abrir un abanico de variados genes que codificaron más tipos de proteínas. Se abrió camino entre otros al colágeno, a la queratina, a enzimas precursoras de la lignina... actores básicos de las futuras estructuras animal y vegetal. El hecho de no necesitar un metabolismo tan rápido como el de las bacterias le concedía suficiente tiempo al ADN para asimilar mutaciones y duplicaciones de genes, que aumentaron la longitud de sus cadenas y su complejidad, con lo

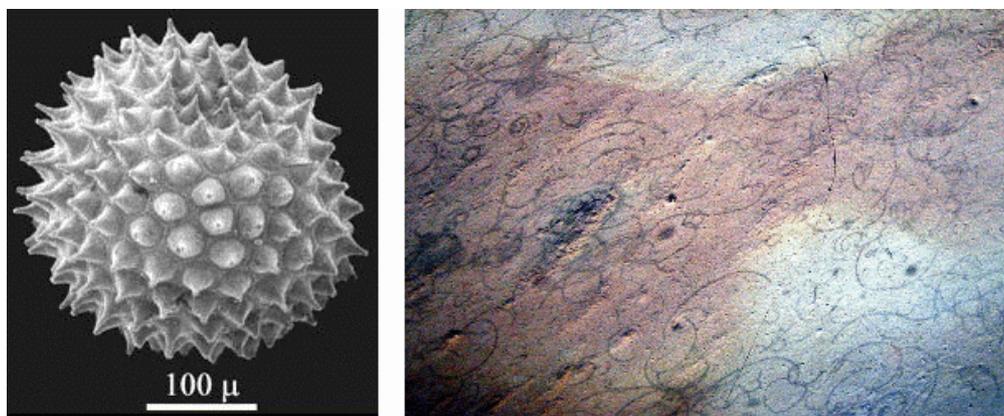
que podía transmitir más información. Realmente se habían abierto las puertas hacia un nuevo mundo.

Los inicios de la historia fósil de las eucariotas

Las eucariotas se originaron muy atrás en el mundo precámbrico al desgajarse su rama de la rama de las *Archaea*. El árbol filogenético de las eucariotas fija dos líneas principales: la *Unikonta* -un solo flagelo-, por aquello de que muchos disponen solamente de uno de estos apéndices, y la *Bikonta* con dos. Entre los primeros se encuentran las amebas, hongos y animales, mientras que en los segundos están las plantas y otros grupos.

A su ancestro común se le denomina LECA: *Last Eukaryotic Common Ancestro* por similitud al LUCA, común ancestro de todos los seres vivos. Gracias al análisis⁽¹⁶⁾ de proteínas que las más antiguas arqueas han transmitido a las eucariotas, se ha determinado que LECA tendría que ser más parecido a un *Bikonta* que a un *Unikonta*. Es decir, sería un ser unicelular con un núcleo y dos flagelos. En 2015 se descubrió⁽¹⁷⁾ en el fondo del océano Ártico un nuevo tipo de arqueas cuyo genoma procariota, por lo que se sabe hoy en día, es el más parecido al eucariota. Se trataría de las *Lockiarchaeota*, quizás la imagen actual de LECA.

Es difícil de valorar cuándo debió aparecer LECA, ya que las células son blandas y tienen muy pocos elementos que puedan dejar un resto fósil. Muchas arqueas de la actualidad no disponen de paredes celulares (sólo membrana citoplasmática) y hay que suponer que así eran las más primitivas, de forma que estos organismos raramente han dejado restos reconocibles. Esto no quiere decir que el registro fósil del Precámbrico no pueda dar pistas sobre la evolución de las eucariotas. Y vamos a ver cómo nos lleva mucho más adentro en la profundidad de la edad del planeta.



Acritarco (imagen: Virginia Tech, astroseti.org, CC) y *Grypania spiralis* (Wikipedia, GNU FDL 1.2)

Hasta hace poco se creía que las eucariotas más antiguas habían dejado unos fósiles conocidos como acritarcos. Se parecen a esporas o quistes producidos por las algas de hoy en día. El acritarco más antiguo se ha encontrado en China y tienen una edad comprendida entre 1.800 y 1.900 millones de años.

Sin embargo perdieron su récord al saberse que el fósil de *Grypania spiralis* es aún más antiguo. *Grypania* es una especie de organismo macroscópico con forma de cinta enrollada, y que se cree que quizás pertenezca a un temprano grupo eucariota. Se encontró en unas rocas emplazadas en la formación Negaunee Iron en Míchigan que están datadas en 2.100 millones de años.

En 2010 se ha reportado⁽¹⁸⁾ el descubrimiento en Gabón (África) de una serie de organismos, posiblemente ya **eucariotas con costumbres coloniales**, también de hace unos 2.100 millones de años.

Un poco posteriores, de hace 1.900 millones de años, son los fósiles del yacimiento canadiense de Gunflint. La mayoría de los investigadores consideran que son antiguas bacterias aunque el biólogo alemán Wolfgang Kumbrein opina⁽¹⁹⁾ que se tratarían de las evidencias más tempranas de especímenes del reino taxonómico Fungi -los hongos-. De 700 millones de años más tarde proceden unas estructuras multicelulares encontradas en el ártico canadiense, conocidas como *Bangiomorpha pubescens*, y que se interpretan como probables algas rojas.



Fósiles precámbricos de organismos eucariotas coloniales de Gabón (África) datados en 2.100 millones de años (Abderrazak El Albani et al, 2010, Nature, fair use)

La aparición de *Grypania spiralis*, o de los fósiles del Gabón, se producía unos 200 o 300 millones de años después de que comenzara el incremento de la concentración de oxígeno atmosférico. En aquellos momentos el clima global y la dinámica de la corteza terrestre eran relativamente estables, mientras que el nivel de nutrientes a disposición de la cada vez más abundante masa de organismos vivos llegaba a ser relativamente escaso. Se supone que tales condiciones fueron motores favorecedores de la aparición de las células eucariotas. Pudo ser que la disminución de nutrientes favoreciera la evolución de simbiosis entre células que, al complementarse reciclando unas a otras sus residuos metabólicos, suplementaban los cada vez más escasos aportes externos a sus necesidades alimenticias.

Hasta aquí la historia de como se consiguió la pieza fundamental para que la evolución continuara, la célula eucariota.

12. La reproducción sexuada

En el capítulo anterior vimos como la evolución “inventó” la célula con núcleo. Era condición necesaria para poder intentar el salto a una reproducción sexuada. Por reproducción sexuada entendemos aquella modalidad en la que la carga genética, normalmente de dos individuos, puede mezclarse abriendo una posibilidad de cambio adicional a la espontánea variación por mutación de los genes individuales. Todo se lleva a cabo a partir de la fusión de dos células haploides -las que tienen en su núcleo un solo juego cromosómico- dando una diploide -de doble juego cromosómico-.

Si lo pensamos, esta forma de supervivencia del acervo genómico paradójicamente supuso la entrada en escena del hecho de la muerte del individuo. Hasta entonces las bacterias generalmente se dividían en dos hijas, las dos exactamente iguales a la madre, con lo que podemos pensar que sobrevivían por duplicado... y así hasta el final de los tiempos.

Sin embargo con la reproducción sexuada el genoma sobrevive en los hijos, pero los individuos progenitores desaparecen tarde o temprano. Esto que puede ser un gran dilema filosófico se ve sobrepasado por la “irracional” naturaleza, que nos lo plantea como un camino más de éxito para la Vida. Pasemos a diseccionar el contraintuitivo fenómeno de la reproducción sexuada.

Bryan Sykes, genetista de la universidad de Oxford, en su libro “*La maldición de Adán*” propone una teoría que explicaría el porqué de la aparición de la reproducción sexuada. Sería la condición necesaria para la supervivencia de los organismos complejos. Es una obviedad decir que en la biosfera conviven desde la más humilde bacteria hasta el mamífero más sofisticado. Y que ambos pueden estar en continua situación de agresión/defensa. La bacteria salmonela puede arruinar la vida al humano, aunque durante el largo camino de convivencia este último haya desarrollado mecanismos de protección. Sin embargo la velocidad del metabolismo suele ser directamente proporcional a la simplicidad del organismo que lo maneja. Es decir, una bacteria tiene una mayor probabilidad de desarrollar y acumular mutaciones en los códigos genéticos que le dictan sus estrategias de ataque. Mientras que un ser más

organizado mantiene un metabolismo más lento y por tanto manifiesta una debilidad a la hora de ir acumulando mutaciones que le puedan servir para su defensa. La reproducción sexuada en estos últimos sería la respuesta para no ser alcanzado nunca por el agresor en esta carrera armamentística: el intercambio genético entre individuos, y con dos era suficiente, facilitaría la expansión a toda la población de las mutaciones que se manifestaban útiles para la defensa. Según esto la reproducción sexuada fue la clave imprescindible para que los organismos complejos pudieran sobrevivir a las enfermedades microbianas.

La senda evolutiva de la reproducción sexuada

Establecido un posible porqué, volvemos a las manos del maestro John Maynard que razona de la siguiente manera acerca de la senda evolutiva que llevó al detalle operativo de la reproducción sexuada, para él uno de los ocho hitos en el camino de la Vida:

Hubo un momento previo a todo el proceso que consistió en la ruptura del ADN circular de las procariotas en varios fragmentos lineales -los cromosomas-, lo que favorecería la velocidad de replicación, ya que ésta podía empezar en varios puntos a la vez (en el ADN circular de las procariotas siempre empieza por un punto fijo hasta completar la replicación del círculo). Pudo ser que los transposones introducidos por las mitocondrias -y de los que ya hablamos el capítulo anterior- favorecieran el corte del ADN circular en tramos lineales. La teoría de Maynard continúa a través de varios pasos evolutivos, siendo posiblemente el primero la duplicación de la carga cromosómica dentro de una célula -aparecen dos juegos idénticos de cromosomas-, proceso que se abrió camino ya que debía ser una circunstancia ventajosa para la corrección de errores del ADN. El siguiente eslabón sería una división tipo meiosis, algo semejante a la división simple de las bacterias, y que se explicará en el capítulo siguiente, por la que se generarían dos células “normales” haploides, que tendrían por tanto una carga genética simple, un solo juego de cromosomas. Una vez “inventadas” las células haploides, éstas podían fusionarse y dividirse mediante un solo paso de meiosis.

Lo anterior puede parecer un contrasentido. Las células habían conseguido duplicar sus cromosomas y sin embargo, con posterioridad, triunfa la vía de dividirse en dos cada una de las células hijas con una carga cromosómica única, para volverse a fusionar formando de nuevo una célula diploide: ¿el resultado final no era lo mismo, a fin de cuentas? Fue así por un detalle ventajoso: con la segunda vía a veces se generaban

híbridos que eran más vigorosos que las copias exactas producidas tras la simple duplicación cromosómica, ya que se mezclaban mejor las cargas genéticas de ambos progenitores, permitiendo que las mutaciones buenas se reforzaran y las malas se aislaran y desaparecieron del acervo genético de la población.

La teoría de Maynard contempla una última modificación que nos lleva ya a la realidad actual: en la división celular se añadió un segundo paso de meiosis, quedando el primero como matraz en donde se producía una alteración favorable, quizás una de las más importantes, que se concretaba en un entrecruzamiento de cromosomas -del que hablaremos también en una entrada posterior-, lo que enriquecía aún más la probabilidad de variabilidad genética.

Con el anterior procedimiento quedaba asegurada una eficaz y segura transmisión de la carga genética de padres a hijos. Dos seres fusionan el material genético de sus gametos -célula sexual masculina o femenina- en una única célula que generará un nuevo individuo.

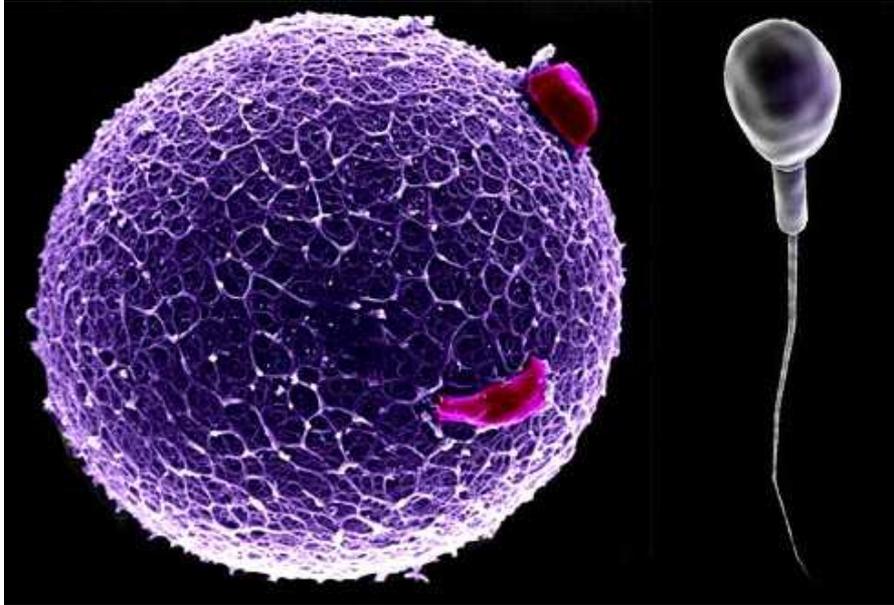
¿Dos gametos desiguales?

A lo largo de este el camino se gestó también una modificación muy significativa: la *anisogamia* -“no, igual, gametos”-, la diferencia de tamaño entre los gametos masculinos y femeninos. Queda por explicar la aparente rareza.

Ya en 1972 G. A. Parker, R. R. Baker y V. G. F. Smith propusieron una teoría para explicarla. El éxito de un gameto depende de la posibilidad de encontrar una pareja. Para ello el organismo que los produce puede optar por dos soluciones. La primera consistiría en dotar a todos los gametos con su carga genética y suficiente “bagaje alimenticio” como para que, mientras le dure, pueda encontrar a su análogo.

En la otra alternativa se podría generar dos tipos de gametos. Unos muy móviles, ligeros sin tener que cargar con nutrientes, y en gran cantidad, con el objeto de aumentar la probabilidad de encontrar pareja por su número casi infinito. Por contra el segundo tipo de gametos serían grandes y escasos, con mucho alimento en sus mochilas, estáticos, puesto que no podrían cargar con su peso, a la espera de sus contrapartes que revoloteaban ágiles en su búsqueda. El éxito de ambos gametos dependió de la colaboración entre ellos mientras coevolucionaban: hay que suponer que en un estadio inicial debieron tener un tamaño semejante, hipotéticamente equidistante al de los del final del proceso evolutivo. A

medida que se avanzaba por este camino se produjo una selección que favoreció la alternativa grande/pequeño, penalizando las soluciones intermedias demasiado grandes, pues eran poco móviles, y las demasiado pequeñas pues agotaban sus reservas antes de encontrar pareja.



Gametos femenino y masculino humanos mostrando en todo su esplendor la anisogamia (Wikispace, CC BY-SA 3.0)

Acudimos de nuevo al profesor Bryan Sykes que nos da una posible explicación de la coevolución de óvulos y espermatozoides que aparece en la anterior teoría. Se ha observado en la naturaleza que algunas algas verdes desarrollan dos estrategias de vida, la habitual como células haploides, y la de “emergencia” cuando las condiciones medioambientales se complican, que es cuando acuden a la fusión de dos individuos para crear una especie de spora. La fusión de los núcleos es pacífica pero no así la de los citoplasmas con su carga de organelos. Entre ellos se produce una batalla de aniquilación de forma que prácticamente sólo uno de los dos citoplasmas -el del óvulo- se queda con sus mitocondrias y demás vecinos. Esta reacción suele ser muy común en la batalla entre células semejantes. Cuando la idea la traspasamos a los gametos que deben fusionarse, es fácil imaginar que en algún momento pudo llegarse al límite de la “sumisión”: Uno de ellos llegó a perder su citoplasma quedando como un saco portador de ADN nuclear y alguna mitocondria donde obtener la energía para mover el flagelo, mientras que el otro aportaba la morfología celular completa. Realmente este es el caso de espermatozoides y óvulos, machos y hembras ¿por qué no pudo ser algo parecido lo que llevó a la anisogamia?

El porqué del éxito

Hay que decir que existen otras estrategias diferentes a la reproducción sexual para conseguir el objetivo de variabilidad en los genes. Podemos afirmar que la facultad de modificar la carga genética ya la dominaban los seres procariotas, puesto que las bacterias, y por diversos procedimientos, son capaces de intercambiar paquetes de genes en un proceso que no supone división celular. El producto de este intercambio entre dos organismos siguen siendo ellos mismos, aunque con un distinto camino futuro que será dirigido por la nueva carga genética.

Lo anterior ha sido el detonante de alguna teoría. Ya que el intercambio lateral de genes, y por tanto el factor de diversidad, lo practicaban también las asexuales procariotas, ¿por qué la necesidad de inventar algo nuevo como el entrecruzamiento sexual? Aquí cabe pensar que la reproducción sexual apareció como una respuesta defensiva frente a las amenazas incorporadas por los intrones de las mitocondrias en las menguadas poblaciones iniciales de eucariotas. Al principio de la correspondiente simbiosis, la población de eucariotas era pequeña en número y con pocos genes, ya que las células eran aún muy primitivas y no había habido tiempo suficiente como para que se hubieran producido muchas duplicaciones en su ADN. Por tanto, en aquellos momentos cualquier mutación dañina podía fácilmente alcanzar a todos los individuos. El cruce de sexos fue el gran truco que favoreció la erradicación de los genes nocivos. De ahí su éxito.

Parece pues que la reproducción sexual fue un éxito anunciado, aunque no por ello nos podemos olvidar que presenta con respecto a la reproducción asexual ciertas desventajas relacionadas con la eficacia: el primer tipo de reproducción, la sexual, es menos rápida, menos prolífica y “malgasta” al 50% de la población, los machos, que no sirven para desarrollar embriones. Por otro lado el hecho de tener que ser “activo” en la búsqueda de la pareja requiere un mayor consumo energético. Pero la realidad es que, a pesar de estos problemas, la reproducción sexual tendría sus ventajas, puesto que se dio el paso y además ha permanecido hasta el día de hoy. Veamos cuáles pudieron ser esas excelencias, adicionales y complementarias a la que nos explicaba el profesor Bryan Sykes unos párrafos más arriba.

Está claro que con la reproducción sexual se obtiene una ventaja biológica al favorecer la variación genética entre los miembros de una especie, ya que la descendencia es el producto de los genes aportados por

ambos progenitores en vez de ser una copia clónica de uno de ellos. Además, cuanto mayor es la variabilidad genética de una población, mayor es su tasa de evolución -simplemente por cuestión de número de genes capaces de mutar- y por tanto su capacidad para protegerse frente a posibles cambios en su entorno: si estos le fueran adversos, es más fácil que pueda existir al menos un grupo minoritario que consiga protegerse genéticamente, extendiendo esta ventaja adquirida al resto de la población que saldría así favorecida. Por el contrario, si la mutación no es beneficiosa, esta quedaría aislada en un grupo acotado de población, cuyos individuos tendrían serios problemas para sobrevivir, y por tanto se reproducirían menos o probablemente nunca, con lo que desaparecería el gen mutado en el acervo genético de la población total. La conclusión es que la reproducción sexual permite proteger las mutaciones beneficiosas y hacer desaparecer las dañinas más rápidamente. Un factor más que favorecía su implantación.

El camino hacia un fenotipo de reproducción sexuada

No se sabe muy bien cómo y cuándo la Vida comenzó a descubrir las grandes ventajas de la reproducción sexuada. No debió ser con la conocida y primitiva *Grypania spiralis* de hace 2.100 millones de años, aunque sí posiblemente con algún organismo intermedio entre los acritarcos, que pensamos fueron algo parecido a esporas, y los primeros fósiles conocidos de eucariotas: una larga temporada que abarca entre hace 1.800 y 1.200 millones de años. De hecho el organismo más antiguo conocido con reproducción sexual es el alga roja *Bangiomorpha pubescebs* en cuyos fósiles de hace 1.200 millones de años se distinguen perfectamente los dos sexos. Una vez más podemos hacer conjeturas sobre cómo debió ser el proceso del cambio basándonos en lo que podemos observar en la actualidad, estudiando las estrategias reproductivas de diversos seres unicelulares vivos, como las de las algas.

Las algas verdes más sencillas se reproducen por simple división celular mientras que las más complejas han transformado alguna de sus células vegetativas en reproductoras, llamadas zoosporas. Éstas disponen de unos flagelos que les permiten expandirse con mayor facilidad. En ambos casos la reproducción es aún asexual.

El siguiente paso hacia la reproducción sexuada más compleja la podemos imaginar en la *Chlamydomonas*, un alga unicelular protegida por una gruesa pared celular. Ésta ha optado por aunar dos caminos reproductores: la simple división celular que produce clones de la madre, o también

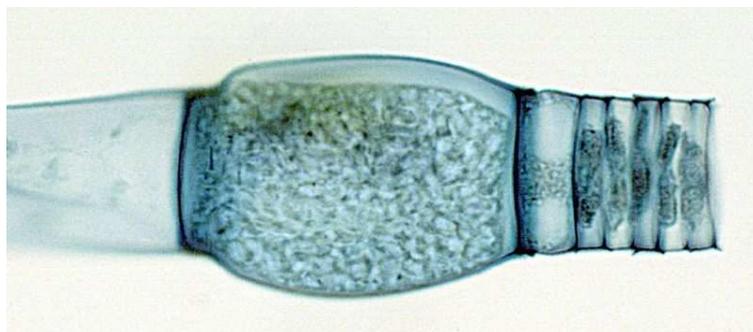
su transformación en gametos semejantes a las zoosporas. Estos gametos se aparean apareciendo al final del proceso una nueva especie de espora, con gran resistencia a las inclemencias ambientales. Estas “esporas” fructifican en condiciones óptimas, dando vida a varias algas. Se ha añadido un escalón de complejidad, al haberse incorporado al proceso la fusión de dos gametos prácticamente iguales.



A la izquierda *Chlamydomonas* (Wikimedia, dominio público) y a la derecha *Spirogyra* (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Algo parecido al anterior tipo de reproducción sexual de un alga unicelular se repite en algas pluricelulares, como las filamentosas *Spirogyra*. En ellas se unen una célula cualquiera de un filamento con otra cualquiera de otro filamento dando un gameto que más tarde desarrollará otro nuevo filamento.

Pero en otras algas filamentosas el proceso ha dado un nuevo paso por el que a partir de células normales se generan unas células intermedias especializadas semejantes a los gametos de la *Spirogyra*. Es el caso del alga *Ulothrix*.



Oedogonium mostrando un oogonio femenino (células hinchadas) y anteridios masculinos (células cortas apiladas) (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Un tercer paso en el desarrollo de la reproducción sexual se da cuando las dos células especializadas que se unen para dar un cigoto son de distinta configuración y tamaño. Es el caso de otra alga filamentosa, el *Oedogonium*, en la que una célula grande, inmóvil y cargada de alimento se une a otra pequeña y móvil (gametos femenino y masculino respectivamente) para dar una especie de espora resistente.

En muchas plantas con sexos diferenciados aún continúa la alternancia de reproducción sexuada por gametos masculinos y femeninos con la asexuada por esporas -o semillas-. En este caso la reproducción sexuada permite a la especie el afianzar su dominio sobre el territorio previamente colonizado durante la fase asexual. Como ejemplo aclaratorio pensemos en las flores de las angiospermas con sus pistilos y ovarios en donde se producen, durante la parte sexuada del ciclo reproductivo, las células haploides, polen y óvulo, para en el mismo elemento estructural engendrar por fecundación las semillas diploides -en otras plantas esporas haploides- de las que se generarán nuevos individuos durante la parte asexuada del ciclo reproductivo.

Tenemos que comentar un último refinamiento evolutivo manifestado en el hecho de que los propios organismos separaron su fenotipo por sexos acomodándose en cada uno de ellos sus formas y funciones a las diferentes estrategias, ya comentadas más arriba, de sus gametos específicos: los grandes, energéticos, escasos y sedentarios óvulos en los femeninos y los pequeños, abundantes y móviles gametos masculinos.

Recopilemos

El éxito del descubrimiento del núcleo celular, con su carga genética en los cromosomas, así como el de la reproducción sexuada, ampliaron en gran medida el abanico de la biodiversidad, tanto en variedad como en velocidad. Sin la reproducción sexuada posiblemente el mundo sería al cien por cien propiedad de las bacterias. Se abrió camino a una de las vías más potentes de renovación del acervo genético de los organismos vivos. Se sumó a los mecanismos que funcionaban hasta entonces, que en gran medida se centraban por un lado en los errores de la replicación del ADN, o bien en las mutaciones genéticas por acción de agentes externos, o en el intercambio horizontal de genes, que siguen practicando las bacterias hoy en día, o en un cuarto proceso que consistía en la acumulación masiva de genoma por simbiogénesis. Con la reproducción sexuada la baraja completaba un quinto palo para jugar la partida de la selección natural.

Todo comenzó en el Proterozoico, y por eso corresponde a este capítulo el que abandonemos por un momento la línea histórica del desarrollo de la Vida, para cumplir con la lógica curiosidad de qué es eso de la herencia, y cómo funciona. Es, pues, el momento de desvelar que son esas cosas de las que hemos hablado tanto sin presentarlas: hay que hablar ya de los genes, de las replicaciones de ADN, del proceso de traducción a proteínas, de los intrones, de la herencia, de las mitosis y las meiosis, del entrecruzamiento cromosómico, del código genético... realmente al escribir todas estas últimas frases veo que queda por aclarar mucha de la materia enunciada.

En el próximo capítulo iremos sin más a por la teoría genética.

13. La genética

En el capítulo anterior habíamos dejado a las células eucariotas que habían aprendido una habilidad que con el tiempo les iba a abrir un mundo de desarrollo y complejidad: la reproducción sexual. En este capítulo vamos a darnos un paseo por un campo teórico de la Vida. No hablaremos de organismos en particular, ni de habitantes de la biosfera, sino de algo compartido por todos, desde las bacterias a los elefantes africanos, pasando por las libélulas o las estrellas de mar: hablaremos de la genética.

La genética

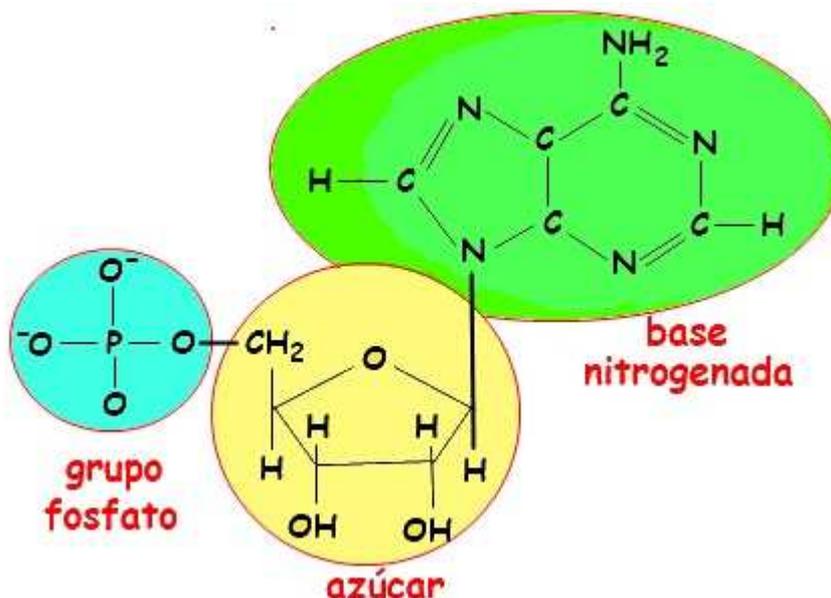
No entenderíamos el proceso de la herencia si no profundizáramos antes en los mecanismos básicos de la genética: qué es un gen, como actúa el ADN, cuál es el diccionario universal para interpretar a los genes, etc...

El *genotipo* es la totalidad de la información genética que posee un organismo, que conjuntamente con el medio ambiente determina la forma de ser tanto física como de conducta de un individuo. Ya sabemos que no sólo se encuentra en los núcleos celulares de las eucariotas o en el nucleoide de las procariotas, sino también en otros orgánulos celulares como los ribosomas, las mitocondrias o los cloroplastos. Es un compendio de la historia evolutiva de cada individuo. Hay una parte de él que tiene una antigüedad de más de 3.500 millones de años, que le ha sido transmitida a través de millones de antecesores, y otra parte nueva, ganada durante el camino, que es exclusiva de cada uno de ellos.

La información del genotipo se esconde en el ADN, y más concretamente en los *genes*, y se transmite mediante la herencia a la descendencia.

Pero ¿qué son los genes?

El ADN es el **Ácido Desoxirribo Nucleico**. Es el tipo de molécula más compleja que se conoce, formada por una larga secuencia de *nucleótidos* (imagen de abajo), que contiene la información necesaria para poder controlar el metabolismo y la herencia en un ser vivo. El ADN es, en definitiva, el “sancta sanctorum” donde reside su información genética.



El nucleótido correspondiente a la base nitrogenada Adenina

Los nucleótidos son moléculas orgánicas formadas por la unión de un azúcar de cinco carbonos, una base nitrogenada y un grupo fosfato. En el ADN el azúcar es la desoxirribosa y las bases nitrogenadas son de cuatro tipos: adenina (A), Guanina (G), citosina (C) y timina (T). Las cadenas del ARN son ligeramente diferentes ya que cambian el azúcar, que ahora es la ribosa, y la timina que pasa a uracilo (U). Tanto en el ADN como en el ARN los nucleótidos se unen entre sí mediante sus grupos fosfato.

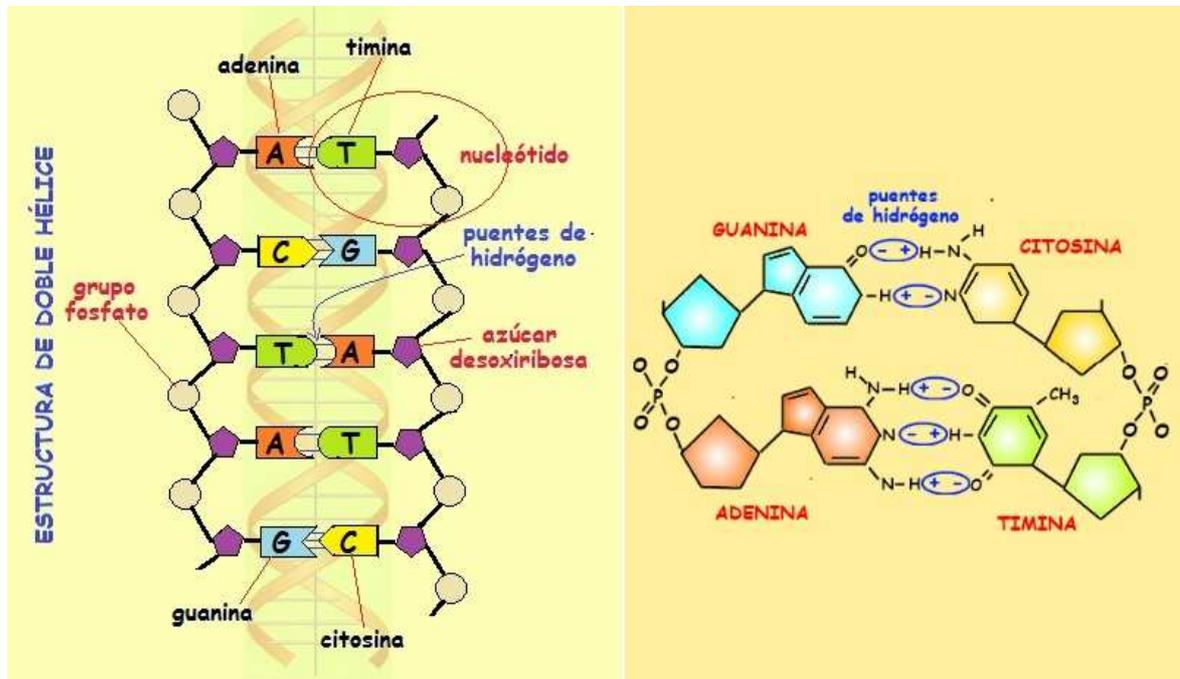
Los nucleótidos son capaces de emparejarse mediante enlaces por puentes de hidrógeno, siempre de la misma forma y siempre Adenina-Citosina y Guanina-Timina. Y no puede ser de otra manera por estrictas razones físicas de la *configuración geométrica* de sus moléculas. Las parejas de nucleótidos *-parejas de bases-* así conformadas se unen ahora entre sí a través de sus grupos fosfato. En la figura de más abajo se pueden ver ambos tipos de enlaces, los puentes de hidrógeno como una mera unión por aproximación de cargas negativas y positivas y el segundo como un enlace fosfodiéster en donde sí se comparten orbitales electrónicos entre moléculas.

Esta sencilla estructura se repite formando un largo polímero que se “retuerce” adoptando la forma de una doble cadena helicoidal que mide de 2,2 a 2,6 nanómetros (un nanómetro equivale a 10^{-9} metros) de ancho, mientras que un nucleótido tiene una longitud de 0,33 nanómetros. Aunque cada unidad individual de la hélice es muy pequeña, los polímeros de ADN pueden ser moléculas enormes que contienen millones de nucleótidos. Por

ejemplo, el cromosoma humano más largo, el número 1, tiene aproximadamente 250 millones de pares de bases. Esta doble hélice, con la ayuda de ciertas proteínas llamadas histonas, se enmadeja y se empaqueta hasta formar los cromosomas.

También se sabe que en algunos casos el ADN puede adoptar una configuración de cuatro hebras.

Los biólogos James Watson y Francis Crick fueron los que en 1953 propusieron la estructura helicoidal para esta molécula, por lo que recibieron el premio Nobel de Medicina en 1962. A decir verdad ellos culminaron el trabajo de muchos científicos anteriores, desde el español y también premio Nobel Severo Ochoa hasta la británica Rosalind Franklin que les dejó la solución en bandeja.



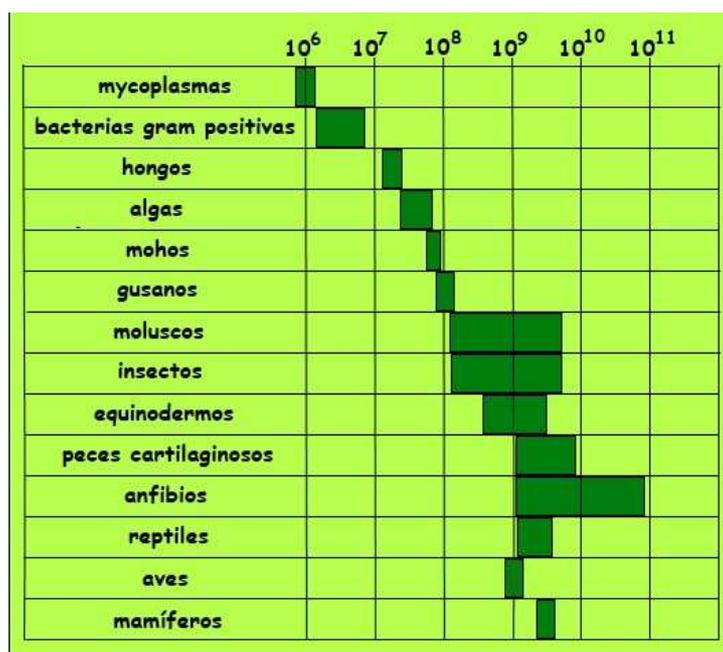
La cadena helicoidal del ADN y detalle de los dos tipos de enlaces que le dan cohesión

Un *gen* está constituido por una determinada sucesión de nucleótidos de la molécula de **ADN**. Esta secuencia de nucleótidos puede ser, por ejemplo, la AATGGCCGTTAG, y su pareja “cremallera” de la hélice del ADN, la TTACCGGCAATC. La disposición ordenada de las cuatro bases constituye una información “digital” necesaria para la síntesis de las proteínas, aunque también informa sobre diversos tipos de ARN, ya sea

mensajero, ribosómico o de transferencia. Por este motivo la cantidad de información se suele dar en pares de bases.

No obstante, no toda la secuencia de pares de bases de la cadena es útil ya que unas partes codifican información (los *exones*) y otras no (los *intrones*). No se sabe muy bien el por qué de la ausencia de funcionalidad de estos últimos, aunque al hablar de la aparición del núcleo celular en el capítulo 11 ya planteamos una teoría de su existencia y función. De esta forma, un gen consistiría en una serie de exones entre los que se intercalan uno o varios intrones no codificantes. Hoy sabemos que cerca del 30% del ADN de las eucariotas está formado por intrones, mientras que las procariotas carecen de ellos.

La longitud del ADN es diferente para cada especie, de forma que incluso especies parecidas tienen cantidades de ADN muy diferentes entre sí, como se puede ver en la figura siguiente.



Longitud del genoma en pares de bases

El del hombre tiene 6 mil millones de pares, es decir, incorpora una información equivalente a 60.000 capítulos como éste que estás leyendo si cada par equivaliera a una letra, en los que se encuentra escrito todo el historial evolutivo de nuestra especie.

Ahora bien, lo realmente significativo es el número de genes diferentes, ya que ello define en principio el potencial químico del ADN. El arroz tiene

unos 50.000 genes, la mosca 13.700 y el hombre 27.000. Produce sorpresa la comparación entre el arroz y el hombre, aunque se cree que los genes humanos son más eficientes. El tamaño del genoma del *Trillium*, planta de la familia de los lirios, es más de 20 veces el de la planta del guisante y 30 veces el de los humanos. Algunas amebas unicelulares tienen un genoma 200 veces el tamaño del genoma humano. Estas incongruencias, que se conoce como la *paradoja del valor C*, pueden explicarse por la existencia del ADN no codificante, del que hablaremos unos pocos párrafos más adelante.

En la figura anterior hemos visto cómo a medida que se va avanzando en la escala evolutiva, parece como si el genoma tendiera generalmente a hacerse mayor. Aunque no es una regla perfecta entre familias sí lo es entre las especies dentro de una misma familia. Pero ¿cómo sucedió esto? ¿cómo pudo ser que los antiguos ácidos nucleicos alargaran sus cadenas?

En el capítulo 11 hablando de la “teoría del hidrógeno” de Martin y Müller, ya comentamos la aportación de las mitocondrias al ADN de sus hospedadoras. Ésta fue una vía, aunque también hay otras teorías.

Como la que explicaba ya en 1985 el biólogo Thomas Cavalier-Smith partiendo de la realidad apuntada un par de párrafos antes: un organismo más evolucionado desarrolla un metabolismo más complejo, que simplemente requiere un mayor espacio donde llevar a cabo su química, lo que al final supone una célula mayor. Como hay una correlación entre la actuación del ARN ribosómico -en donde se fabrican las proteínas- en el citoplasma celular y el ARN que transcribe el ADN en el núcleo, es preciso un núcleo más grande en una célula más grande. El proceso de mitosis (hablaremos de este tipo de división celular un poco más abajo) de un núcleo más grande, con sus estructuras de microtúbulos, centriolos y husos, pudo requerir cromosomas más largos. Esto no suponía un mayor número de genes, ya que se necesitaban los que se necesitaban. Así que el ADN creció duplicando y duplicando largas porciones de su cadena molecular. Es un hecho que casi la mitad del ADN de las células eucariotas consiste en secuencias de nucleótidos que se repiten centenares o miles de veces.

Pudo ser consecuencia de este desmedido crecimiento el que en las células eucariotas exista un exceso de ADN que creemos no expresa directamente proteínas, el llamado ADN no codificante, del que sólo ahora empieza a conocerse algunas de sus funciones. En la especie humana **sólo el 5 %** del

ADN son genes codificantes. En las células procariotas, sin embargo, se usa casi todo el ADN.

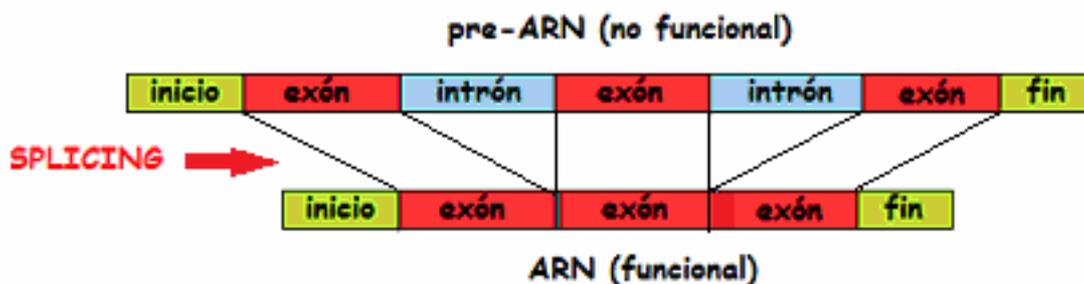
Hasta hace poco al ADN no codificante se le llamaba ADN “basura”, ya que se suponía que no desarrollaba ninguna función y, como hemos dicho, era el resultado de antiguas duplicaciones en la cadena del ADN y restos de genes desactivados. Sin embargo, en los últimos años está ganando fuerza la teoría de que todo ese material genético no codificante sí debe tener alguna funcionalidad, como pudiera ser el dotar al ADN de su forma y estabilidad fisicoquímica, o bien ejercer una función reguladora controlando el nivel de expresión génica, entre otras. En 2003 se inició el proyecto ENCODE (**ENC**iclopedy **Of DNA Elements**) que pretendía constituirse en una completa enciclopedia del ADN. Los estudios desarrollados han llegado a conclusiones que echan por tierra el concepto del *ADN basura* al concluir que por lo menos el 80% de la cadena de ADN considerada como “no codificante” tiene actividad biológica y hace que el ADN codificante se exprese, se active o se silencie. Es como si fuese un gran panel de control con millones de interruptores, que según se posicionen alteran el resultado final de la expresión de los genes “activos”. Es decir, que estos no funcionan de forma individual bajo el lema “un gen-una proteína”, sino que todo quedaría en manos de redes extensas de interacción entre grupos de genes.

De todas formas no debería extrañarnos la existencia del ADN “basura”, ya que debe ser consecuencia casi espontánea de la evolución. El comportamiento general de ésta no es que se corresponda ciertamente con algo ordenado, perfectamente diseñado en todos sus detalles y eficiente; al contrario, se comporta casi como una gran chapuza de recorta y pega. Los fenómenos de degeneración de algún gen y consiguiente pérdida de su funcionalidad, así como la inmersión de virus en las cadenas del ADN es una realidad que se ha venido produciendo a lo largo de toda nuestra historia genética. Y el hecho de que todas estas “imperfecciones” no hayan sido lavadas se debe simplemente a que no son perjudiciales, no hacen daño en el funcionamiento metabólico, y tocarlas sin necesidad supone un riesgo de desequilibrio.

Esto último no sólo es el resultado de la “indiferencia”, sino que también podría ser así por sus ventajas. A mayor longitud mayor las oportunidades. Cualquier modificación “indiferente” en la cadena de nucleótidos que conforman el ADN entra a formar parte en el acervo genético con futuribles. En el entorno ambiental del momento de la alteración la mutación se manifiesta como irrelevante. Pero en un entorno cambiante

puede ser probable que en un futuro las nuevas condiciones medio ambientales den una oportunidad a un gen hace mucho tiempo mutado, incluidos los de la cadena de ADN no codificante, un gen que lleva consigo lo que en las nuevas circunstancias se manifiesta como una ventaja evolutiva. De esta manera podemos generalizar que a mayor longitud del ADN “basura” mayor es el número de mutaciones “indiferentes” que alberga y a la vez mayor es el número de oportunidades durmientes a la espera de activarse cuando el medio favorezca su ventaja. Quién sabe si esta pueda ser la defensa futura frente a enfermedades hoy en día incurables ¿por qué hay individuos que no desarrollan una enfermedad aunque estén contagiados con el patógeno que la produce? Tengo que reconocer que esto último es una mera especulación mía pero bien pudiera ser.

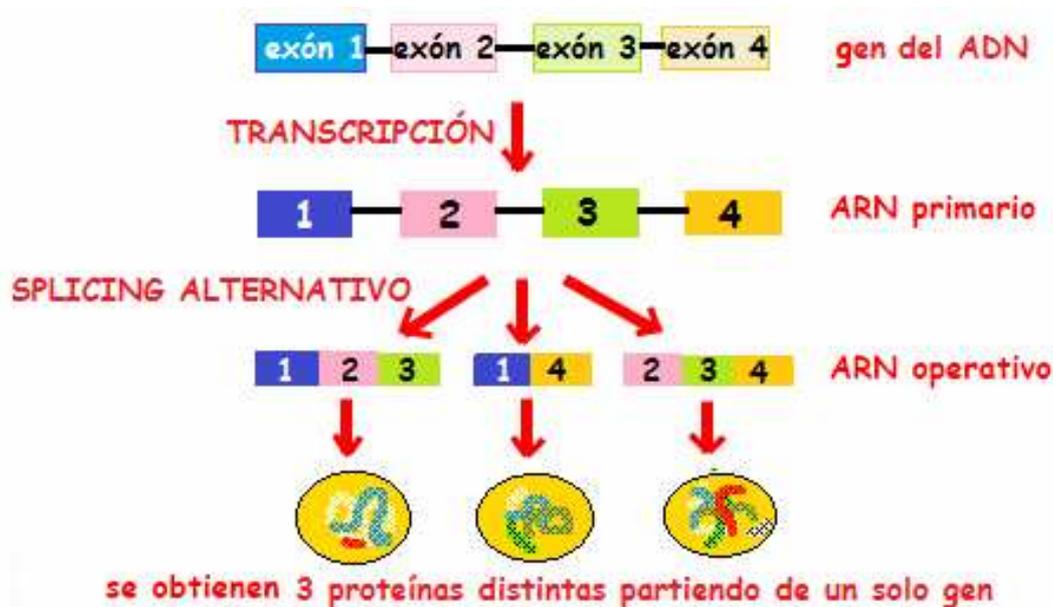
En los organismos eucariotas las secuencias codificadoras de exones dentro de un gen normalmente no son continuas, sino que, como ya sabemos, están interrumpidas por las secuencias no codificadoras de intrones. Cuanto más evolucionada es una especie más cantidad de intrones tiene. Cuando se ha de codificar una proteína o un ARN, los intrones deben desacoplarse, y sabemos que lo hacen dentro del núcleo, para que la cadena de exones se reúna después antes de empezar su trabajo. Todo ello constituye lo que llamamos *splicing*. Es, efectivamente, una fuente de posibles errores y cambios, aunque también es una fuente de versatilidad.



Transcripción de la secuencia codificadora del gen del ADN al ARN mensajero

Durante el proceso de splicing pueden producirse distintas alternativas de combinación de los exones -**splicing alternativo**-, de tal manera que a partir del mismo pre-ARN mensajero pueden obtenerse diferentes proteínas (ver figura siguiente). De esta forma, la cantidad y variabilidad de proteínas posibles aumenta considerablemente sin que lo tenga que hacer el número de genes. De hecho, se calcula que en el ser humano cerca del 50% de transcritos primarios son susceptibles de sufrir splicing

alternativo. Llegando al caso extremo hoy por hoy conocido, el del gen Dscam de *Drosophila*, que presenta 38.000 variantes de *splicing*, y por tanto de proteínas subproducto, un número mayor que el del total de sus genes.



Esquema del funcionamiento del splicing alternativo, mediante el cual un mismo gen puede expresar diversas proteínas distintas

Lo anterior refuerza las conclusiones del ENCODE y pone patas arriba la idea, casi ley, de que a cada gen le corresponde una proteína. Las particularidades del proceso de expresión de los genes que exponemos a continuación ayudarán a reforzar el entendimiento del concepto anterior.

Tanto en procariotas como en eucariotas, al comienzo de la secuencia codificante de un gen aparece una sección de ADN denominada *promotor*, que es capaz de activar o desactivar la transcripción del gen, proceso que suele estar mediado por proteínas específicas llamadas *factores de transcripción*. Incluso los propios intrones participantes en el splicing pueden realizar estas funciones de regulación. *Este proceso es como poner una llave en la cerradura y abrir la puerta.*

Pero hay otra modalidad de expresión de genes por la que *se abre la puerta con un mando a distancia*. Es otro tipo de mecanismo de control que está constituido por los *interruptores genéticos*, que son estructuras distintas a los promotores y que están constituidos por dos elementos: los *potenciadores* y los *factores de transcripción*. Un potenciador, o intensificador, es un fragmento de la propia cadena de ADN no

codificante, que puede encontrarse cerca del gen o alejado de él -incluso a miles de nucleótidos de distancia- y que presenta unos lugares específicos de unión física para los factores de transcripción. Cuando los factores de transcripción se unen al potenciador, el gen se «activa», produciéndose la transcripción. Los potenciadores son como un cerrojo wifi en donde tiene que entrar una llave determinada para que la transcripción tenga lugar.

Lo verdaderamente importante es que muchos genes tienen más de un potenciador y por lo tanto más de un «interruptor». Esto permite que un único gen juegue su papel en distintos momentos, *cuándo*, y lugares del desarrollo del organismo, *dónde*, existiendo un control independiente para cada uno de ellos. Es como si los genes fueran una especie de subrutinas estándares dentro del software del ADN a las que se acude cuando un programa más general requiere de su intervención.

Y esto es tremendamente importante, ya que puede explicar el distinto camino que escogen las células para realizar unas y otras diferentes funciones: la situación química en un momento determinado durante el proceso de crecimiento embrionario selecciona un potenciador y no otro, y por tanto orienta a la célula a desarrollar, por ejemplo, funciones musculares o funciones nerviosas o funciones estructurales.

Como vemos, es todo un proceso complejo y sofisticado que permite que los organismos celulares alcancen fenotipos muy desarrollados. Pero no olvidemos su inicio, que se remonta en la simbiosis que creó las mitocondrias. Y con ellas los transposones, los intrones, con su capacidad de autorrecorte. La célula reaccionó de muchas maneras para aplacar el problema, entre otras aplicando el splicing aprendido de los transposones a los trozos en que quedaban divididos sus genes, proceso por el que no solamente limpiaba y reconstruía la cadena completa de un gen inicial, sino que en el proceso se producirían además errores que formarían nuevos genes, los cuales a su vez expresarían nuevas proteínas. Inicialmente los errores podrían tener poco efecto, pero con el tiempo la nueva proteína podría asumir una función novedosa. Es sorprendente cómo de forma fortuita la deriva de las eucariotas para combatir a los intrones hizo a sus genes más versátiles y más capaces de apoyar nuevas estrategias evolutivas.

Hasta aquí hemos definido qué es el genotipo, cómo son los genes y algunos mecanismos de activación del proceso de transcripción. Pasemos a ver cuáles son los códigos secretos que traducen la información inmersa en

las secuencias de nucleótidos de los genes de forma que se den las instrucciones precisas para sintetizar una proteína.

El código genético

Todo funciona gracias a un manual de contraseñas llamado código genético. Por su sencillez resulta brillante y elegante. Por su universalidad resulta abrumador: todos los seres vivos utilizan este manual de reglas secretas, desde la más humilde bacteria a una cactácea, desde un hongo al mamífero más complejo, todos utilizan el mismo manual de traducción. Este código es muy ancestral y prácticamente no ha sufrido cambios, lo que indica un origen único y universal. Realmente es una prueba casi concluyente del origen común de los individuos vivos, de la existencia de un ancestro común. Fuera cual fuera el detonador del origen de la Vida.

Todo está basado en los *codones* o grupos repetitivos de tres nucleótidos seguidos, y en un mismo orden, en la cadena de un gen. Cada codón transcribe la orden de sintetizar uno de los 20 aminoácidos existentes en los organismos vivos.

		SEGUNDA BASE				
		Uracilo (U)	Citosina (C)	Adenina (A)	Guanina (G)	
PRIMERA BASE	Uracilo (U)	fenilalalina	serina	tirosina	cisteína	U
		fenilalalina	serina	tirosina	cisteína	C
		leucina	serina	parada	parada	A
		leucina	serina	parada	triptófano	G
	Citosina (C)	leucina	prolina	histidina	arginina	U
		leucina	prolina	histidina	arginina	C
		leucina	prolina	glutamina	arginina	A
		leucina	prolina	glutamina	arginina	G
	Adenina (A)	isoleucina	treonina	asparagina	serina	U
		isoleucina	treonina	asparagina	serina	C
		isoleucina	treonina	lisina	arginina	A
		metionina	treonina	lisina	arginina	G
	Guanina (G)	valina	alanina	ácido aspártico	glicocola	U
		valina	alanina	ácido aspártico	glicocola	C
		valina	alanina	ácido aspártico	glicocola	A
		valina	alanina	ácido aspártico	glicocola	G

Código genético: en el centro los aminoácidos que expresan cada terna de nucleótidos

Sabemos que cuatro son los nucleótidos formantes del ADN, adenina (A), timina (T), guanina (G) y citosina (C), y además el uracilo (U), que en el ARN sustituye a la timina. Si los agrupamos de tres en tres, con repetición, tendremos 64 (4^3) posibles ternas, 64 posibles codones. Dado que solamente se deben sintetizar 20 aminoácidos está claro que a un mismo aminoácido le puede corresponder más de un codón, pero nunca un mismo codón expresará más de un único aminoácido. A eso se le llama una relación “degenerada”. Si no fuera así, la probabilidad de error en las traducciones que se realizan en los ribosomas sería muy elevada.

Hay tres ternas que codifican la orden de parada en el proceso de síntesis de la proteína. Y hay un codón, el AUG, que se corresponde con el aminoácido metionina, que codifica el inicio. Todos los procesos de traducción de una secuencia de nucleótidos en otra de aminoácidos comienzan por el reconocimiento del codón de iniciación. Así, todas las proteínas comenzaran por este aminoácido, AUG. De esta manera se asegura una correcta lectura de la secuencia de ternas de nucleótidos. El proceso termina cuando se llega a uno de los codones de parada.

Todo el proceso de síntesis de una proteína viene dirigido por un ARN mensajero (ARNm) y requiere una gran complejidad. Hay que recordar que el mensajero se crea por copia de un tramo de una de las cadenas de la hélice del ADN, siguiendo la regla de los pares homólogos de nucleótidos, G-C y A-U. Es lo que llamamos la **transcripción**. Una vez formado el ARN mensajero llega a los ribosomas, en donde se lleva a cabo físicamente la **traducción**, construyéndose así las proteínas según la secuencia de aminoácidos indicada por el mensajero y gracias a la aportación de los adecuados materiales -aminoácidos- que realiza un ARN de transferencia (ARNt). El ribosoma está constituido por otro tipo de ARN, el ribosómico (ARNr), unido a una serie de proteínas específicas. Hablaremos de este proceso unos párrafos más abajo.

Hay diversas teorías sobre la aparición de este código mágico, que inicialmente debió ser muy ambiguo, aunque ninguna concluyente. Realmente su origen es una más de las piezas desconocidas del mundo prebiótico y de la aparición de la Vida.

Una de las teorías más reconocidas es la que explica el origen de cada uno de los tres nucleótidos del codón. La primera letra estaría relacionada con el precursor del aminoácido concreto que sintetiza. La segunda letra del codón estaría relacionada con la hidrofobia o filia del aminoácido. La tercera letra está “degenerada” y no implicaría en principio ninguna

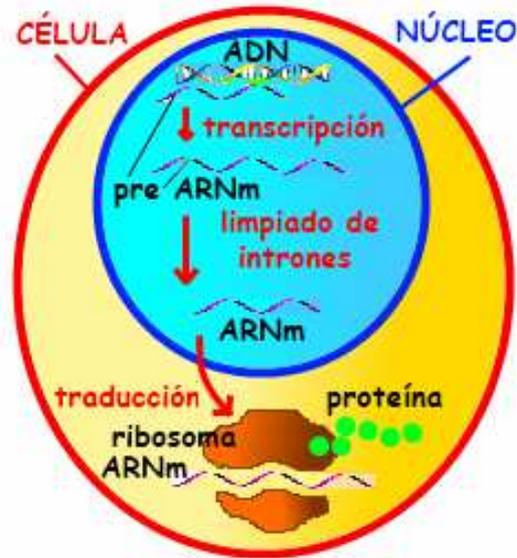
información concreta. Pero dos posiciones, las dos primeras letras, a ocupar por cuatro letras -cuatro nucleótidos- da 16 posibilidades de información, lo que proporciona un potencial para expresar 15 aminoácidos más un codón de parada. Inicialmente, en los albores de la vida metabólica, sólo existirían 15 aminoácidos, que “compitieron” entre ellos por una tercera letra, como así parece que es en la realidad para los 15 aminoácidos más comunes. Los otros cinco aminoácidos posteriores -hasta los 20- tienen menos variación en la tercera posición, como el triptófano que sólo es secuenciado por un codón acabado en G. Esta tercera posición debió imponerse a través de mecanismos de selección natural, ya que se ha demostrado matemáticamente que la actual estructura del código genético es la que con mayor efectividad evita las posibles mutaciones y sus perjuicios: con ello se disminuirían, por un lado, los problemas de fidelidad en la replicación de la cadena ADN, al haberse diseñado codones con funciones similares, y por otro, los problemas de errores durante la traducción en el ribosoma, al interpretar varios codones distintos a aminoácidos semejantes. La distribución de la tercera letra tras las parejas iniciales fue como fabricar diversos comodines para una misma jugada, lo que habría dificultado el que sucedieran los errores.

Del ADN a las proteínas

¿Cuál es el proceso que desde la información codificada en la doble hélice del ADN nos conduce hasta el abanico de funciones dirigidas por moléculas de proteínas?

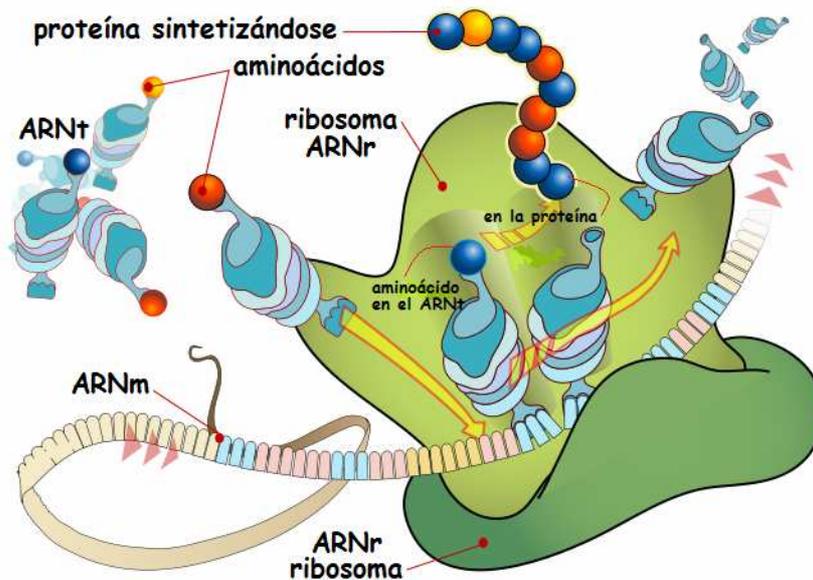
En líneas generales, la información que contiene el ADN en sus secuencias de nucleótidos se transcribe a un ARN mensajero de acuerdo al código de emparejamientos. Para ello una enzima ARN-polimerasa crea algo semejante a una burbuja que aísla la porción de ADN que se va a duplicar y separa sus hélices. En este espacio se va a generar el ARNm por copia homóloga de una de las cadenas del ADN abierto. Si el nucleótido del ADN es la Adenina, el ARNm que se está montando como una cremallera incorporará en esta posición un Uracilo. Si es una Guanina el diente del ARN será una Citosina. Y así según los posibles emparejamientos.

El ARNm así formado se le conoce como “pre ARN” ya que hay que procesarlo y limpiarlo de intrones para dejarlo sólo con los exones, según un proceso explicado un poco más arriba. El ARNm resultante sale del núcleo y se dirige al ribosoma para el siguiente paso: la traducción.



Proceso general desde la información genética a la síntesis de una proteína. Aquí se observa cómo la membrana del núcleo separa físicamente la labor de los intrones de la síntesis de proteínas

La traducción (ver el sentido de las flechas rosas de la figura siguiente) se realiza sobre el entramado de moléculas de ARNr ribosómico y proteínas que constituyen la estructura del ribosoma. El ARNm mensajero lleva las órdenes que son interpretadas por diversos ARNt de transferencia, que, como disciplinados trabajadores, leen la instrucción de un codón y capturan el correspondiente aminoácido que incorporan a la cadena de la proteína que están fabricando.



Proceso de traducción en un ribosoma (Wikimedia, dominio público)

Una posible explicación del inicio del software genético

En el mundo anterior al ARN los ácidos nucleicos, es decir, las moléculas equivalentes al ADN o ARN actual, debían ser del tipo de las *ribozimas*, una mezcla entre un “ácido *ribo*.nucleico” y una “en.*zima*“. Podríamos decir por tanto que serían sencillas moléculas de ARN con capacidad enzimática, incluso para autorreplicarse cuando actuaban sobre ellas mismas. A partir de las ribozimas se llegó a las modernas proteínas.

El paso de las ribozimas a las proteínas enzimáticas fue un proceso gradual de evolución entre estos dos tipos de polímeros, al final del cual una proteína heredó no sólo la función genérica de enzima, sino destacaría en una muy concreta y particular equivalente a la que desarrollaba la ribozima madre, como podía ser la regulación de alguna reacción química concreta.

RIBOZIMA → PROTEÍNA MODERNA

En 1983 el biólogo húngaro Gánti Tibor argumentaba con la idea de que si buscamos en esta ruta que llevó de las ribozimas a las proteínas enzimáticas, ambas con funciones parecidas, encontraremos el origen del software genético, desde la duplicación de polímeros basada en pares de nucleótidos hasta el origen de la cadena de montaje de las proteínas que, como vimos al final del capítulo anterior, es el resultado de una relación entre nucleótidos, una ribozima y aminoácidos: los ARN mensajeros y de transferencia, en el ribosoma, capturando aminoácidos para formar las proteínas.

El proceso pudo ser como se describe a continuación, siguiendo una idea del también biólogo húngaro Eörs Szathmáry (ver la figura siguiente).

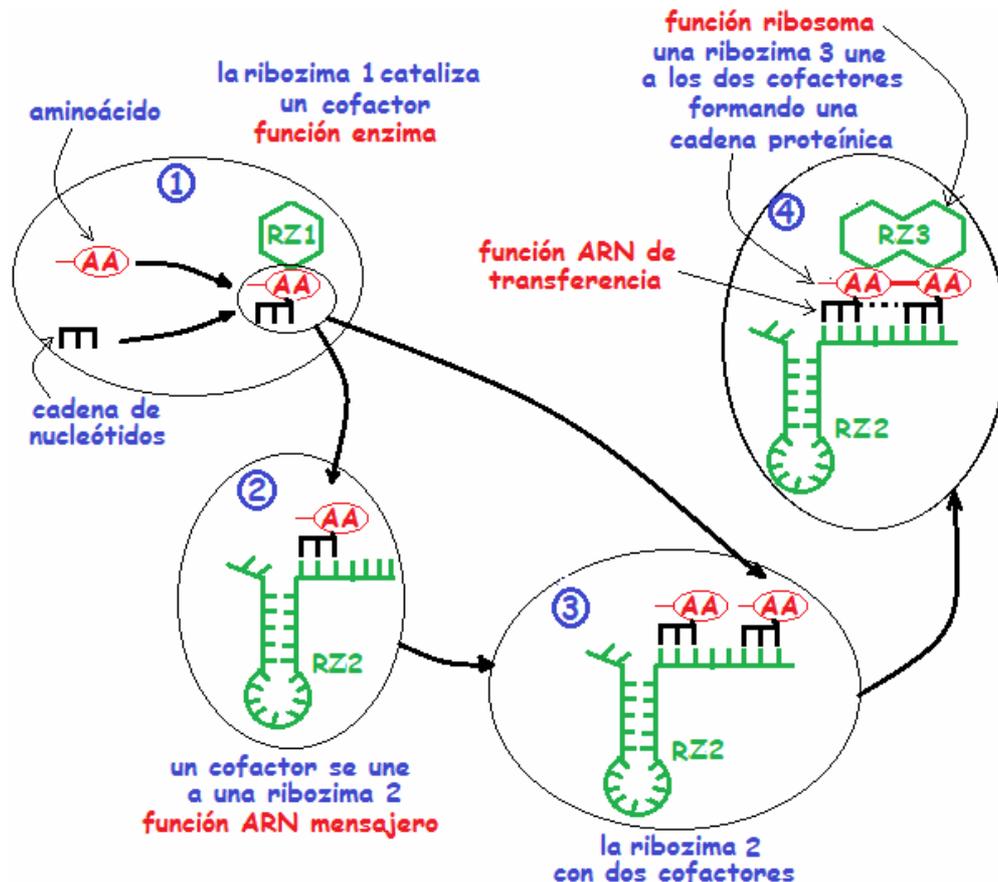
En la “sopa” del mundo bioquímico casi primitivo donde nos movemos *coexistían de forma independiente los ácidos nucleicos tipo **ribozimas** con **nucleótidos** y **aminoácidos***. Eran unas más dentro del infinito número de moléculas que se estaban gestando en aquel ambiente. Los aminoácidos interactuarían con las ribozimas mediante espontáneas uniones químicas, ayudándolas a mejorar la función enzimática y a facilitar su replicación.

¿Cómo consiguieron establecer esta colaboración?

Paso 0. LOS AMINOÁCIDOS AYUDAN A LAS RIBOZIMAS

Las propias ribozimas (RZ1) se encargaron de catalizar una unión entre aminoácidos y nucleótidos, con el resultado final de que se iban formando

unas “moléculas ayudantes”, técnicamente un *cofactor*, con la particularidad de que posteriormente algunas de ellas se adaptarían sobre otra ribozima.



Posible inicio de las diversas funciones del ARN según la teoría del biólogo Eörs Szathmáry (A partir del libro de John Maynard Smith “The major transitions in evolution”). En esta imagen las ribozimas, representadas por hexágonos, no ejercían función estructural, sino solamente la función de ayuda catalizadora.

Pasos 1 y 2. AMINOÁCIDOS + NUCLEÓTIDOS + RIBOZIMAS → COFACTOR → UNIÓN DE COFACTOR CON OTRA RIBOZIMA

La estructura de unión entre aminoácidos del cofactor y una segunda ribozima (RZ2) la formaba la cadena de uno a varios nucleótidos del cofactor, que se unirían por el sistema de pares a los nucleótidos de la ribozima (RZ2). Estas uniones serían muy específicas a la vez que fácilmente reversibles, características que más tarde iban a ser cruciales en la replicación del ADN con la posterior traducción a proteínas. La teoría avalada por experimentos demuestra que una tríada de nucleótidos puede

presentar las mejores características para este tipo de enganche. Lo que nos lleva a la idea de los codones del código genético.

En el proceso, representado en la figura siguiente, nos encontramos ya con una ribozima (RZ1) catalizando un cofactor, la figura más ancestral de una enzima. Luego tenemos a un cofactor unido mediante pares de nucleótidos a una ribozima (RZ2), que ejerce una función de algo semejante a un ARN mensajero. En estas uniones nos encontramos con lo que probablemente serían tríadas de nucleótidos, una de las bases del código genético. Pero también podemos imaginar que este esquema podía repetirse de manera que se formara una cadena de varios aminoácidos, colateral a otra cadena de tripletes de nucleótidos, colateral a su vez a una tercera cadena, la de la ribozima.

Paso 3. FORMACIÓN DE CADENAS DESUNIDAS DE AMINOÁCIDOS, TRIPLETES DE NUCLEÓTIDOS Y RIBOZIMAS

Otra ribozima (RZ3) debió catalizar la unión de los aminoácidos transformándolos en algo parecido a una primitiva cadena proteínica, de forma que, en primer lugar, la ribozima base ejercería la función de ARNm portador de la información; en segundo la cadena intermedia de nucleótidos formaría lo que puede considerarse un ancestro del ARNt de transferencia (interpreta la información del ARNm mensajero y la transforma en aminoácidos); y por fin las cadenas de aminoácidos catalizadas por la ribozima RZ3, antecedente del ribosoma, acabarían constituyendo oligopéptidos (proteínas o semejantes).

Paso 4. UNIÓN DE LAS CADENAS FORMADAS EN EL PASO 3 → FORMACIÓN DEL SOFTWARE GENÉTICO

El siguiente paso sería la reutilización de las cadenas de nucleótidos que quedarían libres tras el proceso. En este momento es cuando se debió diferenciar en la estructura del ribozima mensajero las fracciones que desarrollarán la “*función gen*”: algunas partes se comportarían mejor como mensajeros, perdiendo poco a poco su capacidad catalítica, mientras que otras partes seguirían con su función metabolizadora como enzima. Esta división aportaría ventajas en cuanto a la rapidez de la función enzimática y la reutilización de los mensajeros: el resultado pudo ser el inicio del ARNr (ribosómico) a partir de la ribozima RZ3.

La anterior hipótesis de Eörs Szathmáry puede ser plausible, aunque seguimos con incógnitas de las que desconocemos su solución: la duda se centra en el tamaño, ya que el ARNm es más largo que una ribozima y las

proteínas son más largas que los oligopéptidos sintetizados en el proceso anterior.

Y ahora, una vez conocidas las bases generales de la genética a partir de lo dicho en este capítulo pasaremos a analizar los principios universales de uno de sus principales subproductos: la herencia. E intentaremos explicar los misterios de la división celular y la transmisión de la carga genética.

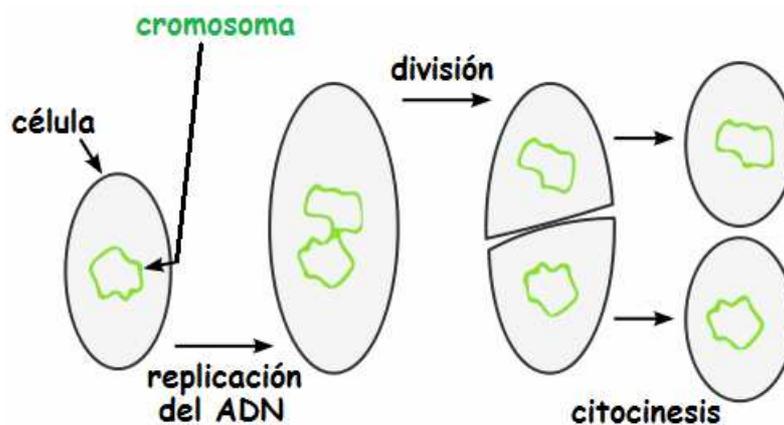
14. La reproducción

En el capítulo anterior presentamos los entresijos del genoma y cómo funciona el proceso, desde la replicación de aquel hasta la generación de proteínas basadas en su información. En este capítulo completaremos esta visión general planteando una visión somera de las vías de transmisión de la información genética, lo que conforma los hechos de la reproducción y la herencia.

¿Por qué vamos a profundizar en las reglas de la herencia?

Precisamente por ser la base fundamental en el análisis de la evolución de las especies. La información genética de los padres se hereda. En el camino, los genes son intervenidos por múltiples factores externos que hacen que varíen, que añadan o que eliminen secuencias genéticas, resumiendo: que modifiquen el genotipo de los seres vivos. Y estas modificaciones heredadas son las que, conjuntamente con la presión ambiental, han conducido a la Vida desde la primera síntesis celular hasta la múltiple variedad de seres que conviven en la actualidad.

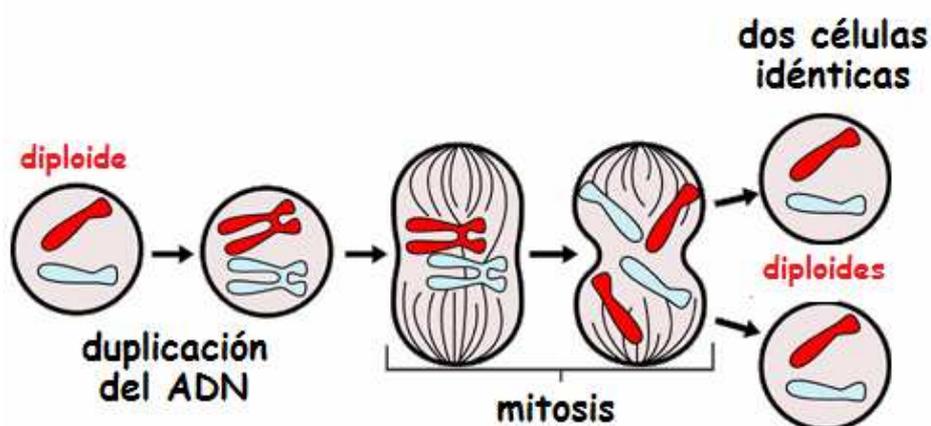
Las células se reproducen. De forma variada. Desde la solución más sencilla hasta seguir procesos más complejos. El objeto de la reproducción es, en definitiva, la continuidad de la cadena de cesión de información genética.



Reproducción por fisión binaria (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

La solución más sencilla es “partirse por la mitad”, la *fisión binaria*, que es una *forma asexual* de reproducirse adoptada por organismos muy elementales como las bacterias y algunas eucariotas unicelulares. Se duplica el material genético, se parte la membrana y el citoplasma, y se reparte todo en dos nuevos seres independientes. Este tipo de reproducción produce una tasa de crecimiento exponencial. Por ejemplo, bajo condiciones óptimas, la bacteria *Escherichia coli* se puede dividir una vez cada 20 minutos.

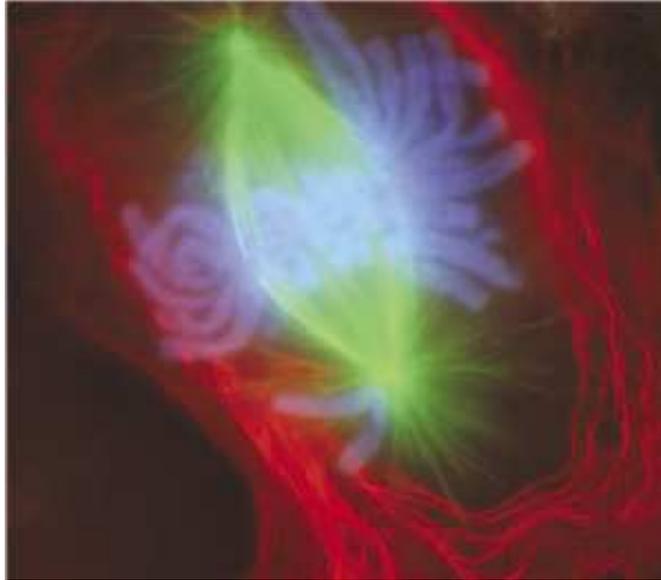
Las desarrolladas células eucariotas han optado por una división más compleja, siguiendo dos necesidades fisiológicas. Por un lado, como componentes fundamentales de los organismos pluricelulares, precisan *reemplazar células* que han muerto o han perdido su funcionalidad, y así reparar los posibles daños del organismo al que pertenecen: en este caso deben hacer copias idénticas y situarlas en el lugar de las caídas en combate. Esto lo consiguen siguiendo el proceso de mitosis que se explica a continuación.



División por mitosis (Wikimedia, dominio público)

En la *mitosis* se generan *dos células completamente idénticas* a la madre y como hemos comentado es la base para el crecimiento y reparación de tejidos de un organismo complejo o bien la base de la reproducción asexual. En el primer paso de la mitosis se produce la duplicación de los cromosomas. Inicialmente adoptan una forma semejante a un aspa con un punto central llamado *centrómero*. A la vez, se duplica un orgánulo del citoplasma que se llama *centrosoma* que es el que organiza el material del citoesqueleto celular, los microtúbulos. Los centrosomas duplicados tienen una forma de estrella con pelos que mientras van creciendo se desplazan

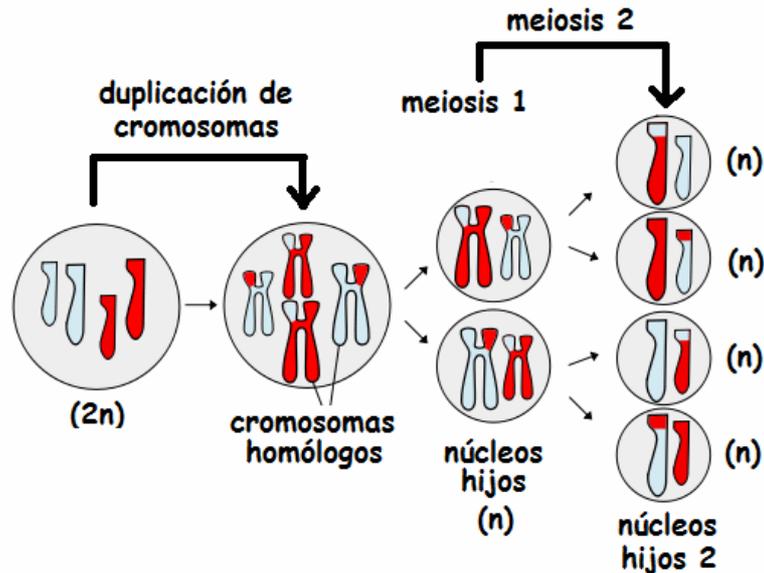
cada uno hacia polos opuestos de la célula, generando una especie de huso de microtúbulos.



Fase intermedia de la mitosis. Pueden verse los centrosomas ya separados y el huso, ambos en verde, al que ya están fijos los cromosomas de color azul (Wikimedia, dominio público)

Posteriormente se desintegra la membrana nuclear quedando libres los cromosomas que se disponen en el plano ecuatorial de la célula. Allí se unen por su centrómero a uno de los microtúbulos del huso el cual va a actuar como cuerda tractora. Los centrosomas situados en los polos tiran de los cromosomas, que se dividen en dos, separando los dos juegos resultantes. Poco a poco los dos paquetes de cromosomas se van rodeando de una nueva membrana nuclear. Mientras, se va dividiendo también el citoplasma, tomando la célula una forma de cacahuete, hasta que finalmente se parte. Y así se consiguen dos nuevas células genéticamente clónicas. Etimológicamente mitosis viene del griego *μιτον*, “hebra” con el añadido de *-sis*, lo que quiere decir “en situación de, con aspecto de... hebras”, en referencia al aspecto del huso.

Advertimos aquí que este procedimiento es el primer paso para la reproducción sexual con transmisión de variedad genética. Esto se consigue a través del proceso llamado meiosis, que hace posible la existencia de células haploides que llevan la mitad de la dotación cromosómica de la especie a la que pertenece. De esta forma, tras el encuentro posterior de dos de este tipo de células, los gametos, se construirá una célula diploide completa con doble juego cromosómico.

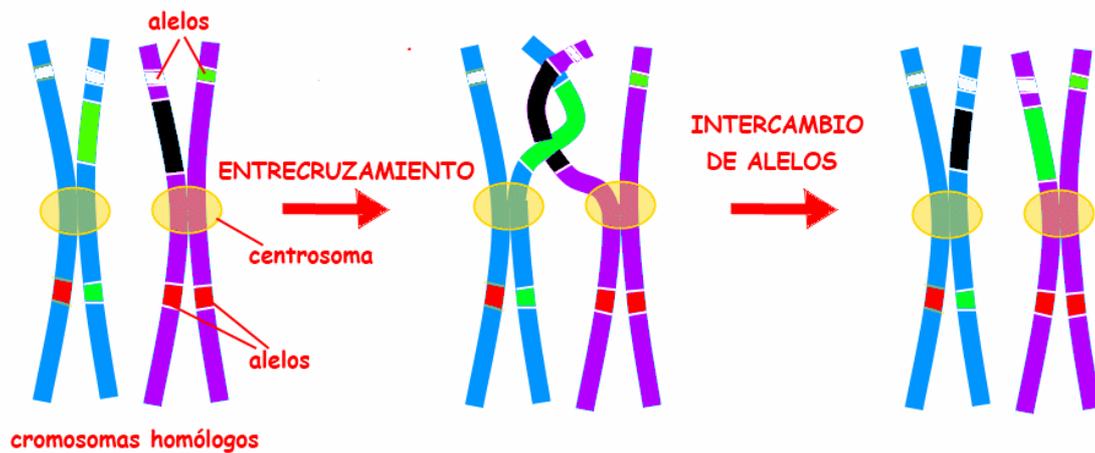


División por meiosis. Obsérvese por el código de colores que hay intercambio de material genético entre cromosomas no homólogos (A partir de Wikimedia, dominio público)

Sin embargo, la *meiosis* es un proceso de división celular por el que una célula con dotación cromosómica doble ($2n$) experimenta *dos divisiones sucesivas* según un proceso de generación de huso y arrastre de cromosomas parecido al de la mitosis, con el resultado de *generar cuatro células con un juego sencillo de cromosomas* (n) cada una. En la primera división se duplican los cromosomas formando el aspa. En este estado, a diferencia de en la mitosis, cada pareja de aspadas homólogas intercambian material genético por entrecruzamiento. Tras lo cual las parejas de aspadas se ven sometidas a un proceso similar a la mitosis, generándose dos células con la mitad de los cromosomas, pero replicados en forma de aspa. En la segunda fase de la meiosis se completa otra mitosis partiéndose las aspadas, apareciendo al final cuatro células haploides. Se comprende por tanto el significado etimológico de la palabra meiosis: del griego *μείωσις*, “disminución”.

Es importante hacer énfasis en lo que se dijo acerca de que en la primera fase del proceso de meiosis los cromosomas homólogos pueden *entrecruzar sus genes* (ver figura siguiente) por lo que el cromosoma heredado en el gameto, casi con toda seguridad, no tiene la misma secuencia de genes que en los cromosomas paternos o maternos originales. Eso ocurre físicamente porque los cromosomas paternos o maternos en la primera fase de sus meiosis se pueden tocar y solapar en parte, de forma que al dividirse se producen errores, ya que se unen fragmentos

cromosómicos en donde no correspondería encontrarlos. Como si se barajase el material genético de cada par de cromosomas y se reconstruyeran de nuevo de forma aleatoria. El resultado es que en las células haploides hijas los cromosomas no tienen la misma información genética, no son clónicas, ni el mismo orden de genes que el de la cadena de la célula progenitora diploide.



Entrecruzamiento de dos cromosomas con intercambio de alelos, paso inicial de la meiosis I

Con posterioridad, al juntarse los gametos masculinos y femeninos se reconstruyen las células diploides, emparejándose los cromosomas homólogos de ambos gametos. Disponen cada uno de la misma información genética que los padres respectivos pero diferentemente secuenciada y emparejada: el genotipo intrínseco es el mismo, pero el fenotipo, la futura manifestación externa del hijo, puede variar. *En resumen*, la meiosis es la solución que ha triunfado en los organismos más complejos a partir de la cual se producen gametos masculinos y femeninos, que con posterioridad se unen entremezclando la dotación genética de las células progenitoras masculina y femenina. El resultado es la generación de un nuevo ser diploide con un acervo genético distinto al de los padres.

La primera persona que intuyó que en el proceso de la herencia había oculto algo parecido a lo comentado fue el monje agustino austriaco Gregor Mendel, que en el siglo XIX realizó una serie de ensayos con el entrecruzamiento de variedades de guisantes. Seleccionó siete características de estas plantas y vio la evolución de las mismas en las plantas hijas a través de diversas generaciones. Comprobó cómo se iban transmitiendo estas siete características de una generación a otra y con qué proporciones se repetían, desaparecían o se entremezclaban. Y sacó una serie de conclusiones experimentales que podían resumirse en que

cuando cruzaba dos variedades puras –no híbridas- de una misma especie, los descendientes *eran todos iguales* e idénticos a uno u otro progenitor. Además constató que al cruzar entre sí los híbridos de la segunda generación, sus descendientes se repartían entre *cuatro fenotipos diferentes*, uno el de su abuela, otro el de su abuelo y los dos restantes el de sus progenitores directos. Mendel también observó que algunas veces no pasaba lo anterior, ya que *rasgos diferentes eran heredados de forma independiente unos de otros*, de forma que el patrón de cómo se heredaba un rasgo no afectaba al patrón de herencia del otro. Se podía heredar uno sólo, o el otro, o bien los dos, sin una norma exacta y repetitiva. Pero nunca supo por qué sucedía lo que él observaba.

Lo atribuyó a unos *factores* que serían algo así como entidades independientes en el proceso de la herencia. Unos, los *dominantes*, se repetían generación tras generación y otros, los *recesivos*, desaparecían. Hoy sabemos que estos factores son los genes, y sus recombinaciones son consecuencia de la existencia de los dos *alelos* que codifican cada característica. Los alelos son cada una de las formas alternativas que puede tener un gen y que se encuentran en el mismo lugar físico de cada cromosoma de la pareja de homólogos.

Tras este rápido repaso sobre la genética y la herencia estamos ahora en condiciones de recuperar la biografía de la Vida, que la habíamos dejado al final del capítulo 12 en un punto en que se había conquistado el núcleo celular y la estrategia de la reproducción sexual que le conducirá al final por un excitante y variado camino. En el próximo capítulo avanzaremos a través del siguiente salto evolutivo de los ocho fundamentales en la serie de John Maynard: el paso hacia la multicelularidad por la que la célula eucariota forma asociaciones en pos de la eficiencia.

15. La multicelularidad puerta de la complejidad

En el capítulo anterior se habló sobre temas tan generales como la genética y la herencia, aspectos fundamentales de la vida de los organismos que vivían durante el Proterozoico, un periodo tan vasto que transcurrió desde hace 2.500 hasta 542 millones de años. Lo sorprendente es que las mismas estrategias de entonces son las que utilizan los seres vivos de hoy en día. En este capítulo vamos a avanzar en el caminar de estas criaturas con una inmersión en una nueva habilidad: la célula eucariota se busca socios para crear complejidad vía la multicelularidad. Adelanto que no hay una especie de “LUCA”, un ancestro común, de los organismos pluricelulares, siendo esta particularidad resultado de la evolución a partir de diversas y diferentes eucariotas.

Si por organismo multicelular entendemos simplemente el formado por varias células, entonces la multicelularidad es tan antigua como los más antiguos fósiles. Sin embargo la mayoría de los biólogos distinguen entre organismos coloniales y los verdaderamente multicelulares, aunque sea difícil precisar el matiz que los distingue. Los auténticos multicelulares presentan una cierta relación de interdependencia entre sus células y además las tienen de varios tipos, cada una de ellas especializada en funciones diferentes. Las células se mantienen unidas dentro de una especie de membrana y tienen la capacidad de influir sobre el desarrollo de sus vecinas. Además, los espacios intercelulares suelen estar rellenos de moléculas estructurales, como pueden ser la proteína colágeno o la molécula inorgánica hidroxiapatita, responsable de la dureza de los huesos.

Si se admite el anterior criterio, la multicelularidad se ha producido en varias ocasiones tanto en tiempos de procariotas como con las eucariotas. Incluso las colonias bacterianas podrían ser multicelulares, ya que en ellas las células individuales se comunican y forman subgrupos con comportamientos especializados.

¿Por qué ha aparecido la multicelularidad tantas veces a lo largo de la historia? Posiblemente porque es el resultado de la adaptación al medio. Quizás un entorno hostil llevó a un pequeño ser unicelular a tener que protegerse asociándose y creando un entorno interno controlado. O bien, quizás fue su respuesta defensiva frente a la amenaza de los depredadores

incrementando su tamaño para protegerse, cosa que conseguía metido en un grupo; o puede que constituyera una asociación que mejoraba la capacidad de movimiento de sus individuos y por ello podían acercarse al alimento o escapar del depredador más fácilmente.

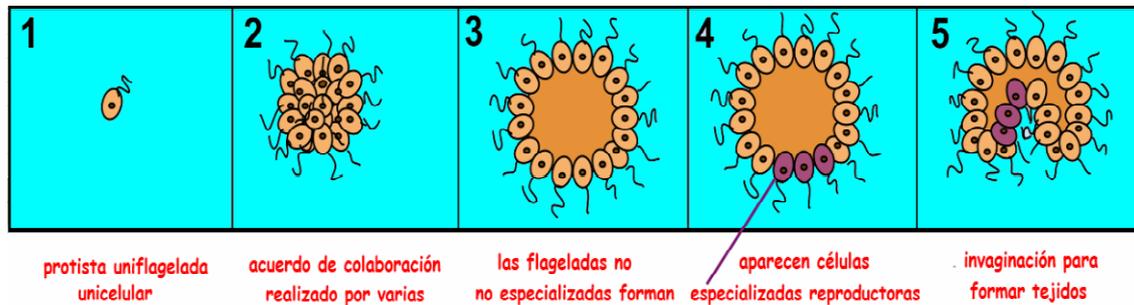
Sea como fuere parece ser que la multicelularidad es un proceso prácticamente ineludible, como así lo sugiere las conclusiones de un trabajo⁽²⁰⁾ de laboratorio en el que a unas levaduras les bastó solamente 100 generaciones en un tubo de ensayo para agruparse en una especie de copos. Y no sólo esto, sino que crecían de tamaño, se reproducían e incluso se producía una diferenciación entre sus células. Características todas ellas propias de un organismo multicelular.

Se sabe que los seres unicelulares independientes disponen de las mismas herramientas, aunque más sencillas, que las que utilizan los pluricelulares para construir sus organismos. Disponen de las mismas proteínas que sirven de unión, como un velcro, con las células de su entorno. Disponen de las mismas proteínas que transmiten mensajes y generan reacciones en sus más próximas vecinas. Sobre sus membranas exteriores también pueden encontrarse moléculas de colágeno. Las proteínas que regulan la gastrulación embrionaria de los organismos pluricelulares las encontramos en los seres unicelulares, posiblemente para dirigir sus ciclos vitales. Sólo bastó acomodar la función de los genes ya existentes en las células individuales de forma que pasaron a coordinar funciones diferentes a las que controlaban hasta entonces. Y esto no fue una tarea ardua ya que se conocen diversos mecanismos evolutivos de los genes que pudieron facilitar este cambio: o por su duplicación, o bien barajando exones con otros genes, o ejecutando modificaciones en sus redes de relaciones o simplemente acomodándose a la nueva función.

Las posibles estrategias de defensa que fomentaron la multicelularidad y que hemos comentado más arriba, han sido comprobadas mediante diversos experimentos con algas unicelulares a las que se les ha dejado reproducir libremente. Tras unas mil generaciones se las ha mezclado con predadores también unicelulares. Unas cien generaciones más tarde estas algas se habían asociado formando unas bolas de dieciocho individuos, lo suficientemente grandes como para que no fueran engullidos por el predador y lo suficientemente pequeña como para que la luz solar llegara a todos sus miembros.

La conclusión que se extrae de lo anterior es que el salto a la multicelularidad en la naturaleza no fue tan especial, las habilidades

estaban allí, sólo había que motivarlas. De lo demás se encargó la selección natural. Aunque bien hay que reconocer que la tarea le tuvo ocupada casi dos mil millones de años.



HIPÓTESIS DE FORMACIÓN DE COLONIAS POR CÉLULAS FLAGELADAS

(A partir de Wikimedia, CC SA-BY 3.0)

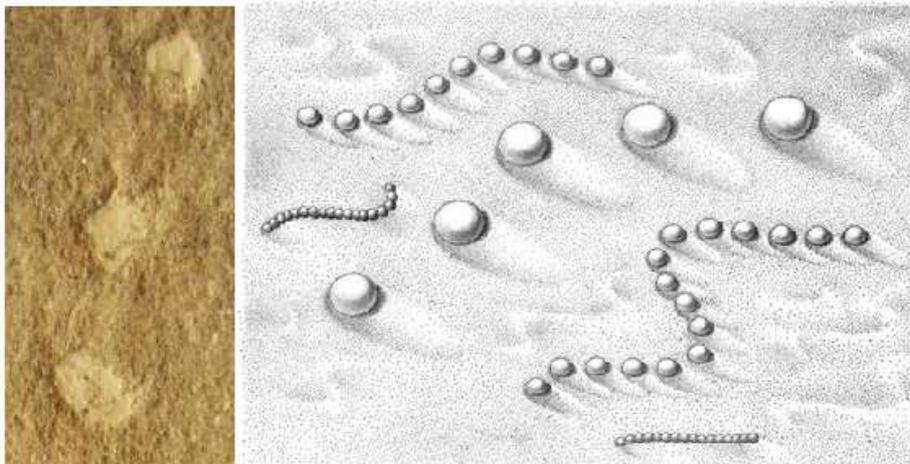
No todos los organismos multicelulares se crearon de la misma manera. Las opiniones más contrastadas apuestan por hasta cuatro tipos de inicios: Un tipo surgiría con el fallo en la división celular paterna por el que no llegan a producirse células hijas, sino que queda una gran masa citoplasmática con muchos núcleos envuelta en una membrana, que más tarde se transformará en un grupo de células independientes. O simplemente la división celular sí se produce y el fallo viene justo después, tras el cual las células hijas son incapaces de separarse. Una tercera posibilidad apunta a lo que parece más plausible, es decir, que el ser pluricelular sería el resultado de la unión de varias células independientes que comienzan a colaborar a un mismo nivel de rol vivencial. Una última hipótesis postula que el organismo multicelular se produjo como un organismo “quimérico” tras unas simbiosis, en la que cada célula aporta su grano de arena a la asociación según sus habilidades.

Ya hablamos de la eucariota *Grypania spiralis*, cuyas evidencias fósiles son muy antiguas (2.100 millones de años), y de la que se cree que era un organismo que optó por la modalidad de no dividir su citoplasma. Forma unos fósiles del tipo de “películas de carbón”, unas improntas bidimensionales encontradas en las rocas del Proterozoico. Posiblemente formaban tapetes bacterianos, aunque algunos tienen unos elementos como escamas y pedúnculos que se asemejan a algas.



Reconstrucción virtual de la morfología externa (izda) e interna (drcha) de uno de los fósiles de Gabón datados en 2.100 millones de años (Abderrazak El Albani et al, 2010, Nature⁽²¹⁾, fair use)

También hemos hablado de los fósiles del Gabón, datados hace unos 2.100 millones de años. Por la época serían bacterias, y se han conservado gracias a que su materia orgánica se había piritizado entre sedimentos. Al estudiarlos mediante técnicas de microtomografía y de espectrometría de masas se ha visto que tanto sus estructuras como sus propiedades químicas correspondían a restos de seres vivos multicelulares.



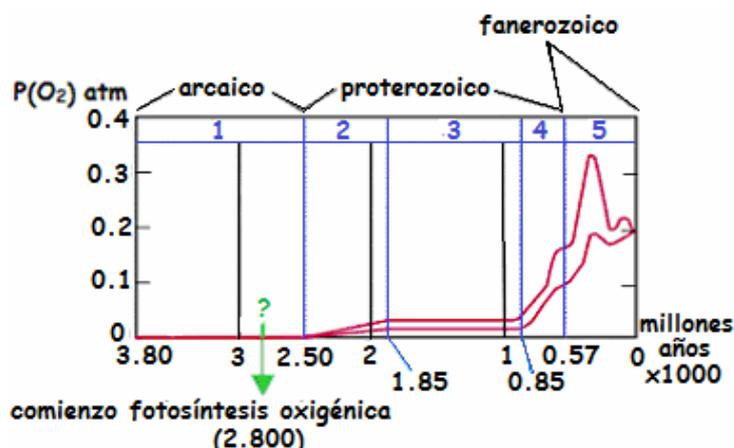
Fósiles de Horodyskia y representación artística de sus colonias (Fedonkin y Yochelson, 2002⁽²²⁾, fair use)

Pero realmente la eucariota multicelular más antigua puede que sea el metazoo *Horodyskia*. Sus fósiles se han encontrado en rocas que datan de hace unos 1.500 a 900 millones de años. Se les describe como una cadena

de perlas conectadas por sus pies mediante una especie de zarcillo. Al comparar estos fósiles situados en un entorno muy próximo se ha visto que se reorganizaban a medida que el sedimento donde se encontraban crecía de espesor, reagrupándose los especímenes más pequeños formando unos más grandes.

También se han encontrado impresiones y surcos en rocas australianas y de la India, de hace 1.200 millones de años, que semejan las huellas producidas por organismos móviles.

En cualquier caso, tanto los antiguos acritarcos como los ya evolucionados organismos multicelulares eucariotas, se dirigían hacia una fase de mayor diversificación y complejidad, cuyo prólogo se dio hace unos 1.000 millones de años. Sería posible, aunque de forma especulativa, que esta expansión estuviera correlacionada con el final de un periodo de estabilidad global. Además la escalada de la multicelularidad coincide con la época del inicio del segundo despegue de la concentración de O_2 en la atmósfera terrestre, como podemos ver en la curva de más abajo que ya mostramos en el capítulo 10 cuando comenzábamos a hablar del eón Proterozoico y que repetimos aquí.



Evolución del contenido atmosférico de oxígeno a lo largo de los últimos 3.800 millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

El O_2 es esencial para la síntesis a gran escala del colágeno, que como ya se ha comentado es a su vez un elemento esencial en la estabilidad estructural de los organismos pluricelulares. No sabemos muy bien el porqué, pero sí es cierto que lo que estaba pasando influyó y mucho. La existencia de un único supercontinente (Rodinia), la fragmentación de los habitats al disgregarse paulatinamente por las fuerzas geológicas, los pequeños cambios climáticos durante un prolongado periodo de

estabilidad, etc... dibujan un escenario en el que había apareciendo un conjunto de nuevos vectores que cambiaron los niveles de presión selectiva. Bien pudo ser que el incremento del O₂ impulsara el inicio de la radiación de las eucariotas hacia los organismos vivos actuales.

Fuera lo que fuera, no consideremos a la multicelularidad propiamente como un “avance” sino como una alternativa más de supervivencia, en unos momentos en que se pudieron estar abriendo nuevos nichos ecológicos dispuestos a ser colonizados por organismos con capacidades no vistas hasta entonces. Sin menospreciar el hecho de que estas capacidades novedosas fueran el factor selectivo preciso para medrar, al usar nuevos procedimientos, en los hábitats de siempre. Sin lugar a dudas la multicelularidad, por sí misma, fue un hito en el devenir filogenético que permitió a ciertos organismos la conquista de nuevas habilidades biológicas, como pudo ser la especialización de las células por funciones vitales o la propagación por células con capacidad de reproducción, que a fin de cuentas son las que llevaron a las espectaculares formas de vida actuales, que tanto nos asombran a los humanos.

La Vida se hace definitivamente compleja

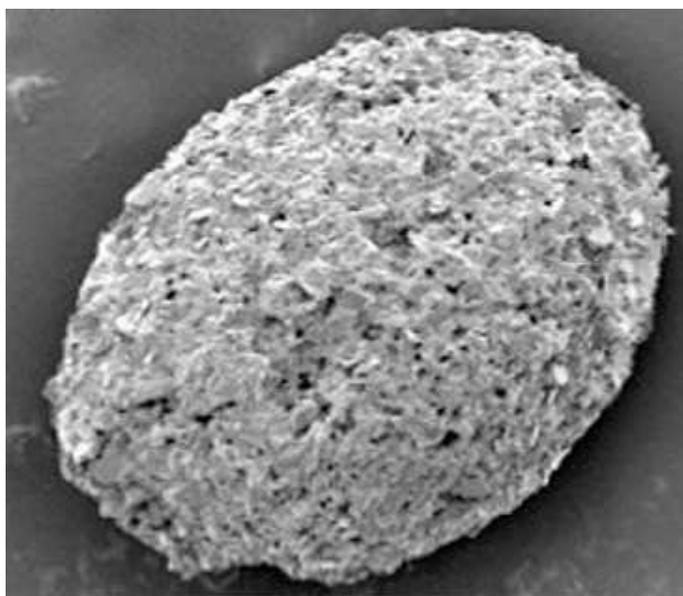
Los organismos que vivían en aquella época se encontraron con una amenaza adicional que debieron sortear: La glaciación “*bola de nieve*” de hace 700 millones de años de la que hablamos en el capítulo 10.

En esta época, como ya sabemos, la biosfera estaba constituida básicamente por microorganismos acuáticos. Muchos de ellos se extinguieron como consecuencia del frío y la vida estuvo a punto de desaparecer por completo del planeta. La pregunta es ¿cómo pudo subsistir durante los largos años de “*snow ball*”?

Se cree que algunos organismos pudieron sobrevivir porque al congelarse lentamente el agua a lo largo del pausado transcurrir de los millones de años, se transformó en un hielo muy transparente. La escasa luz que lograba atravesar la enorme capa de hielo sobre el mar bastaba para mantener el primer eslabón de la cadena alimenticia. Otros organismos seguían manteniéndose en los ecosistemas de las dorsales oceánicas que no habían dependido nunca de la luz del sol y que seguramente no fueron perturbados por la glaciación. En los fondos marinos existían las conocidas fumarolas (recordemos que son emanaciones calientes de gases e iones que surgen por las grietas de la corteza submarina) que, al igual que sucede en las actuales, pudieron albergar importantes comunidades de organismos

extremófilos, con unos metabolismos totalmente independientes del sol. La Vida bien pudo resistir la glaciación global en tales ecosistemas.

En depósitos glaciares de sitios tan alejados geográficamente como el norte de Namibia o Mongolia se han descubierto fósiles de criaturas microscópicas muy simples, que debieron ser las primeras en aparecer después de que terminara el periodo inicial de glaciación, hace 710 millones de años. Se cubrían con una concha mineral de forma redondeada o tubular, presentando la mayoría de ellos un cuello al final de la misma a través del cual saldría un pie del microorganismo. Esas conchas están hechas de partículas de compuestos de silicio, aluminio y magnesio, que estas criaturas recolectaban en su entorno y que luego unían unas a otras acumulándolas sobre su superficie para así formar una protección mineral que les ayudaría a sobrevivir en las condiciones heladas de su habitat.



*Fósiles de hace 710 millones de años, protegidos por una capa de arena
(Fuente: Tanja Bosak, reproducido con el permiso de MIT News⁽²³⁾, fair
use)*

En la imagen anterior, tomada con un microscopio electrónico, podemos ver la forma de estos pequeños fósiles de hasta 10 micras de grosor.

La realidad es que, a pesar de que haya evidencias de la existencia de microfauna, esta tremenda glaciación dejó la vida esquilmada, lo que supuso una oportunidad para los supervivientes, que aprovecharon los espacios abandonados para experimentar nuevas formas. Fue el momento difuso durante el que se debió producir el triunfo del trascendental salto

evolutivo hacia los primeros organismos con tejidos diferenciados y cavidades internas.

No hacía mucho que las células que se habían asociado en colonias habían también empezado a especializarse, encargándose de determinadas funciones y abandonando otras. La decisión no comportaba grandes riesgos para cada uno de sus individuos, ya que la colaboración del grupo les mantenía las espaldas cubiertas: las funciones que abandonaban las desarrollaban otras células de su comunidad. Todo ello suponía una ventaja competitiva enorme, pues la especialización suponía un menor gasto de energía en sus metabolismos, ya que todas y cada una de las células no debían desarrollar todas y cada una de las funciones necesarias para subsistir. Y sabemos que no malgastar los recursos energéticos es clave en el competitivo mundo de la naturaleza.

Para encontrar la primera evidencia fósil que tenemos de organismos multicelulares complejos, es decir, con tejidos diferenciados, hay que desplazarse atrás en el tiempo hasta hace 600 millones de años, aunque los análisis moleculares dan una fecha anterior, cerca de 750 millones de años, cuando se inició este camino en el árbol de la Vida. Recientes descubrimientos⁽²⁴⁾ en formaciones rocosas sedimentarias de Omán apuntan a la existencia de esponjas hace ya 635 millones de años. Contemporáneos de ellas, entre 630 y 550 millones de años, serían los fósiles de la conocida como formación de Doushantuo en China. Incluyen embriones de metazoos, larvas y microfósiles desconocidos, posiblemente de ancestros del filo Cnidaria - medusas y pólipos-. Se especula con la idea de que pudieron ser los promotores de la expansión biota Ediacara. La radiación de esta biota se produjo a lo largo de un periodo de 25 millones de años (565-540 millones de años) para luego desaparecer.

Los más antiguos de estos organismos complejos se han encontrado en Mistaken Point Ecological Reserve, uno de los yacimientos clásicos de la fauna ediacareense. Parecen ser crías de este tipo de animales, en concreto de rangeomorfos, organismos con forma de fronde u hoja de helecho, que superficialmente se parecen a algunos tipos de corales pero que en realidad no tienen paralelismo con ninguna criatura de la actualidad. Se cree que quedaron sepultados en cenizas volcánicas hace 579 millones de años.

Un poco más recientes son los fósiles de un animal encontrados en Australia con una estructura próxima a un esqueleto. Están datados entre 560 y 550 millones de años, lo que los sitúa dentro del Ediacareense,

antes de la explosión del Cámbrico. Se le ha llamado *Coronacollina acula* (ver imagen siguiente) y vivía en el fondo oceánico. Muestra un cuerpo principal con forma de cono truncado del que partían unas espículas que medían de 20 a 40 centímetros de longitud. La construcción de este ser es similar a las esponjas cámbricas, por lo que se le supone un estilo de vida semejante.



Cría de rangeomorfos de hace 580 millones de años (Jack Matthews⁽²⁵⁾, universidad de Oxford, fair use) y fósil de Coronacollina acula (crédito de la imagen: Droser lab, UC Riverside⁽²⁶⁾, fair use)

La fauna Ediacara

Las primeras evidencias de la fauna Ediacara se obtuvieron en Australia, huellas delicadas de pequeños organismos de formas diversas, normalmente discos, cintas o plumas. Con posterioridad se han encontrado abundantes fósiles similares por todo el mundo.

Los animales ediacáricos son los organismos multicelulares complejos más antiguos conocidos, ancestrales formas de vida con cuerpos blandos que no presentaban boca, ni ano, ni órganos internos reconocibles. Podían llegar a medir más de un metro en algunas ocasiones, por sólo unos cinco milímetros de espesor. La solución de “cuerpo plano” sería la que eligieron para equilibrar el incremento de tamaño corporal, es decir volumen, con el necesario incremento de superficie a través de la cual llevar a cabo las imprescindibles interrelaciones con el medio ambiente. Muchos presentan simetría radial o espiral de tres o cinco radios, siendo minoría los organismos de simetría bilateral. La mayoría vivirían inmóviles sobre el sustrato y los más móviles no eran más complejos que una medusa. Los fósiles de Ediacara se encuentran en rocas sedimentarias areniscas, lo que sugiere que vivían preferentemente en aguas poco profundas. Sus

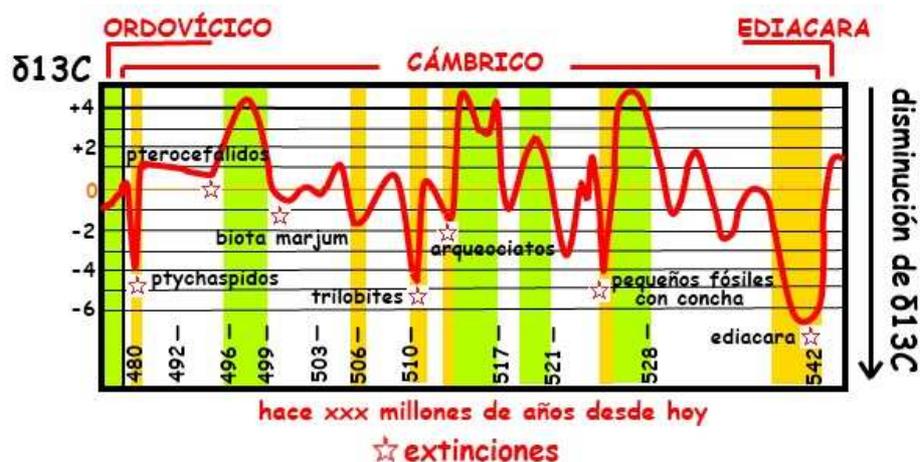
estructuras planas no debían ser muy consistentes y resulta difícil imaginar cómo se las arreglarían en el centro de fuertes corrientes y oleajes.



Fauna Ediacara: Arriba Tateana inflata y Charnia. Abajo Dickinsonia costata, que muestran la apariencia «acolchada» típica de muchos organismos de esta biota (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

A finales de esta época se detecta una fuerte y corta anomalía en el carbono ambiental, un descenso del $\delta^{13}\text{C}$ -un indicador geoquímico que relaciona los isótopos 12 y 13 del carbono- que es a menudo asociado a extinciones en masa en periodos posteriores al ediacárico, como ocurrió durante el Cámbrico. Lo que a muchos hace pensar en un fenómeno breve, a escala geológica, y catastrófico que pudo eliminar a la fauna ediacara, ya que efectivamente se ha comprobado que desapareció de forma abrupta.

Las causas de esta rápida extinción no están muy claras y se prestan a las más diversas teorías. Quizás coexistieron a la par de otra fauna que les modificó el hábitat, o bien pudiera ser que desaparecieran como consecuencia de la presión de depredadores mejor adaptados, aquellos que luego pervivieron con posterioridad. Todo ello unido a posibles cambios de las condiciones ambientales en los lugares donde habitaban, o por alteraciones causadas por la deriva y disgregación de los continentes, por la variación del nivel o de la química de las aguas oceánicas, por una crisis de nutrientes o por alteraciones en la composición de gases y temperaturas de la atmósfera.



Curva del $\delta^{13}C$ durante el Cámbrico desde finales del periodo Ediacara (a partir de Babcock et al.⁽²⁷⁾, 2005, fair use)

Se considera por tanto que estos organismos formarían parte de una especie de “experimento fallido” de la vida multicelular, en un momento en el que aparecieron gran cantidad de fenotipos novedosos que a la postre no funcionaron. Si en su momento fue ésta la única vía de la Vida, su extinción supuso que ésta tuviera que reinventarse y evolucionar con posterioridad a partir de organismos unicelulares no relacionados con los ediacaros.

En el siguiente capítulo, al amparo del genial biólogo Richard Dawkins, seguiremos el árbol filogenético de estos seres que iniciaron su camino durante el Precámbrico, para acabar presentando a los que se prepararon a atravesar la frontera con el nuevo eón, el Fanerozoico.

16. El árbol filogenético del precámbrico

Estamos llegando hacia el fin de los primeros 4.000 millones de años. En este capítulo avanzaremos por el que pudo ser el camino de diversificación de formas que siguieron los organismos vivos, partiendo de los elementales que poblaban el Proterozoico y que manifestarán todo su esplendor durante el siguiente eón, el Fanerozoico, que comenzará con el Cámbrico, periodo en el que veremos como las familias animales y vegetales iniciaron una diversificación de especies que definitivamente serían las precursoras de las actuales.

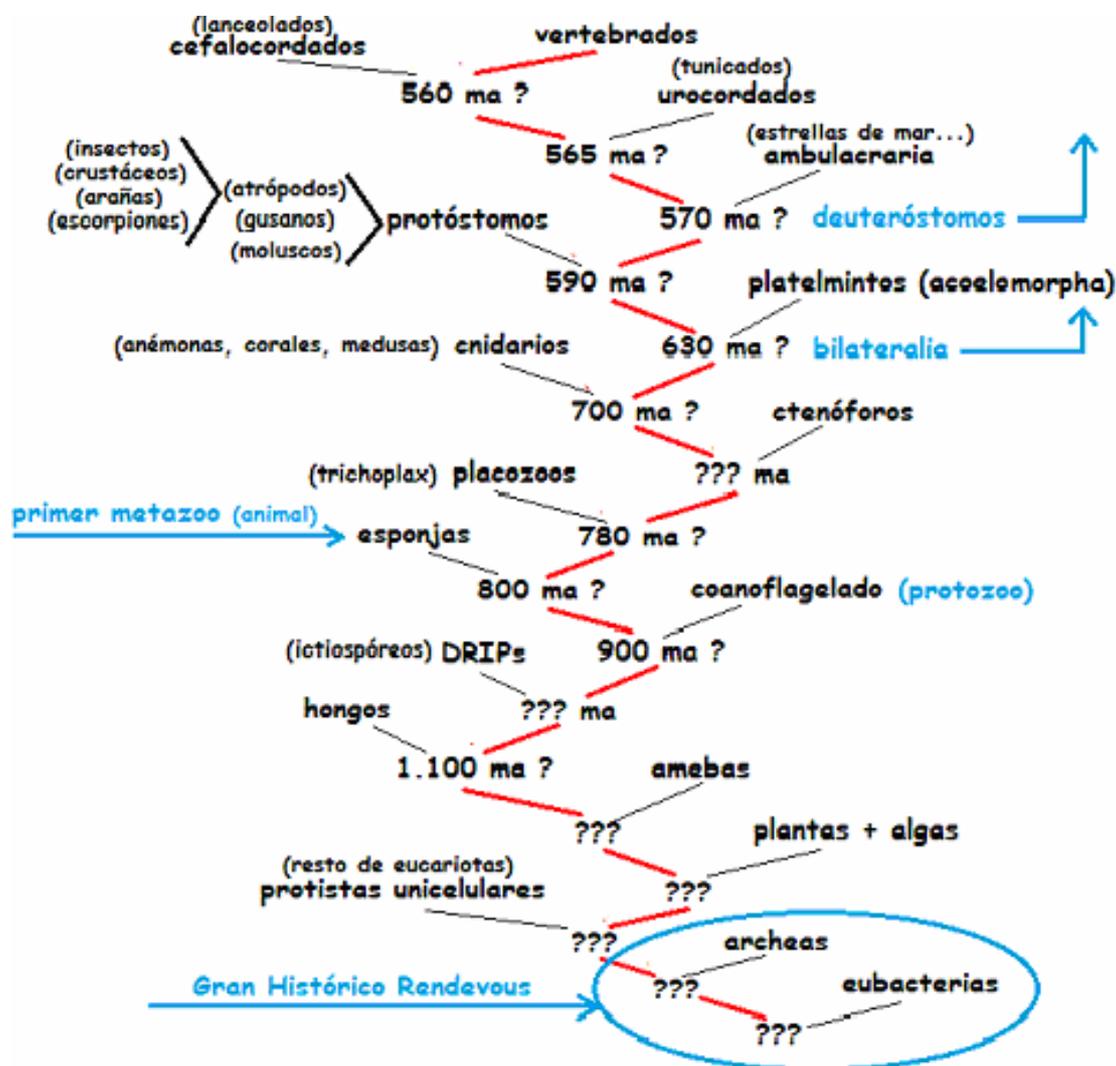


El simple estudio de la traza fósil puede engañarnos al plantear una historia no muy conexas, en la que parece que sólo existen los organismos vivos que ha desvelado el martillo del paleontólogo en el interior de una roca antigua. Pero estos organismos tienen sin duda un pasado complejo, lleno de antecesores que bien pudieron serlo también de seres contemporáneos. Todos los organismos vivos estamos emparentados en una red familiar que se extiende desde la nebulosa del tiempo más primitivo.

Las relaciones familiares de las especies en el periodo donde nos encontramos, el Proterozoico precámbrico, se encuentran difuminadas a lo largo de una pista muy etérea de evidencias fósiles difícilmente analizables. A nuestra ayuda acuden las nuevas tecnologías y el avance en los estudios de biología molecular que nos permiten centrar mejor la horquilla de hipótesis sobre las relaciones cruzadas entre seres vivos, aunque la exacta datación temporal continúa siendo una materia de especulación.

El etólogo y zoólogo britano-keniata Richard Dawkins ha propuesto un posible camino para la última mitad del Proterozoico, basado en los

resultados más verosímiles de estratigrafía, fenotipo fósil y datación molecular. Su “árbol filogenético”, el croquis de la irradiación de los nuevos filos, se plasma en el esquema siguiente, en donde las cifras indican los millones de años que nos separan del punto de diversificación. Por desgracia, aún hay muchos signos de interrogación.



Árbol filogenético correspondiente al Proterozoico, a partir de lo descrito por Richard Dawkin en su libro “The ancestor’s tale” (ma: millones de años)

No se trata de una historia en zigzag. No se trata de una evolución lineal. Es la orla académica de los seres vivos. Resultado de millones de cruces genéticos sexuales, de intercambio horizontal de genes, de alianzas simbióticas, de errores en las transcripciones del ADN, de mutaciones por impactos de partículas y radiaciones... modelados por el particular medio

ambiente de cada momento, expandiendo las oportunidades y limpiando las debilidades.

En cada punto de bifurcación de la senda del esquema anterior vivía un ancestro común. En cada momento, en cada línea de corte horizontal del esquema, podemos asegurar que convivían muchos de los seres que aparecen por debajo de esta línea imaginaria, ellos o sus descendientes. Y que siguieron haciéndolo por encima de la raya, formando un grupo en el que seguían apareciendo nuevas formas y soluciones. El árbol filogenético de Dawkins fue construido desde un punto de vista antropocéntrico, ya que la única cadena evolutiva completa es la de los ancestros del *Homo sapiens*. Sin lugar a dudas, el real es infinitamente más complejo. Sólo hace falta observar la corta línea que representa a las “plantas+algas” para darnos cuenta de que detrás de cada ramificación hay un mundo infinito.

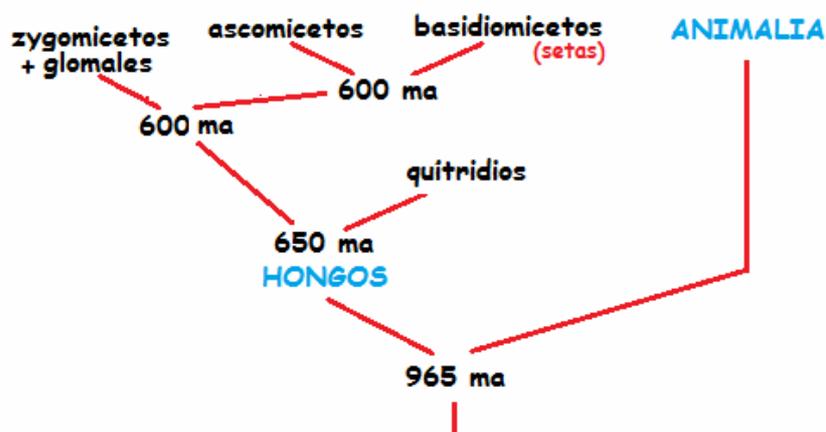
Casi se puede sentir el bullicio de la vida que hay debajo del simple dibujo del árbol filogenético, de estas líneas, de estos nombres y de estas cifras. Transcribo su mensaje.

En una fecha indeterminada, aunque seguro que antes de hace 1.800 millones de años, se produjo el gran salto desde la célula procariota a la eucariota. Más o menos cuando toda la tierra emergida estaría concentrada en el gran supercontinente Columbia. El núcleo celular ya era una realidad con la que se abrió una oportunidad evolutiva para los organismos que habitaban los mares. La tierra firme permanecía solitaria y sin vida, a la espera. No sabía que poco después de la aparición del primer protista eucariota iba a ocurrir otro evento crucial que posibilitaría la “*Tierra verde*”: un paso simbiótico dotó a la eucariota de cloroplasto.

Las dos células, con y sin cloroplasto, diferenciarían sus caminos: las primeras, aquella a partir de las que evolucionarían las plantas y algas actuales; y las segundas, madres del mundo de los hongos y de los animales.

Puede resultar curioso que el reino de los hongos sea un grupo hermano del de los animales y no de las plantas. Como estas últimas, están arraigados en el suelo, no se mueven y el alimento lo consiguen *in situ*. Pero la verdad es que animales y hongos comparten muchas características básicas. Los dos digerimos los alimentos utilizando enzimas, si bien los animales lo hacen en el estómago y los procuran de forma activa, mientras que los hongos viven dentro del alimento y lo descomponen, expandiendo este proceso al crecer sus cuerpos por los alrededores sin necesidad de mudar

de lugar. Compartimos más cosas, como el uso de la quitina y el glucógeno, y la presencia de células flageladas, característica muy importante y en donde se apoyan los cladistas para meternos a hongos y animales en la misma cesta, la de los opistocondos.



Cronología filogenética de los hongos de acuerdo a los estudios⁽²⁸⁾ de Berbee y Taylor (2001) con un punto de partida posterior al sugerido por Richard Dawkins

Dejemos por ahora a los hongos, y sigamos la pista al organismo unicelular que tras millones de años nos va a llevar a los animales.

Nuevas habilidades le llevaron a mejorar su motilidad y su capacidad de alimentación. Creció en tamaño y se transformó en algo parecido a una ameba. Durante unos 700 millones de años no hizo más que vivir y dominar las aguas junto a su antigua compañera que evolucionaba hacia el mundo vegetal, y junto a todos los millones de bacterias que habían decidido que ya estaban bien como estaban. Parece ser que hace más o menos unos 1.100 millones de años se despidió de nosotros una célula sencilla hacia su destino como hongo. Era la época en que dominaba otro supercontinente, Rodinia, con una actividad orogénica que produjo los levantamientos de Grenville. Otros biólogos, como Mary L. Berbee y John W. Taylor, apuestan por una diversificación posterior, hacia unos 965 millones de años. La célula aventurera que emprendió el nuevo camino no se podía imaginar que un organismo tan pequeño como ella iba a parir en el futuro a los organismos más grandes que nunca se iban a ver, como el micelio subterráneo de uno de sus tataranietos en Michigan, el monstruo de Cristal Falls, con un tamaño de 15 hectáreas y 100 toneladas de peso.

Demos un salto de 150 millones de años hacia adelante. Otra célula recibe el toque de la varita mágica y comienza su camino de mutación hacia los

ictiospóreos (los DRIP's), un pequeño grupo de parásitos unicelulares de los peces y animales de agua dulce, conocidos como *Mesomycetozoea ichthyosporea*. Sin embargo, en aquel momento la viajera que eligió su propio rumbo vivía en las aguas saladas del océano, y si ya eran parásitos, lo serían de otros seres unicelulares que seguían también su camino.

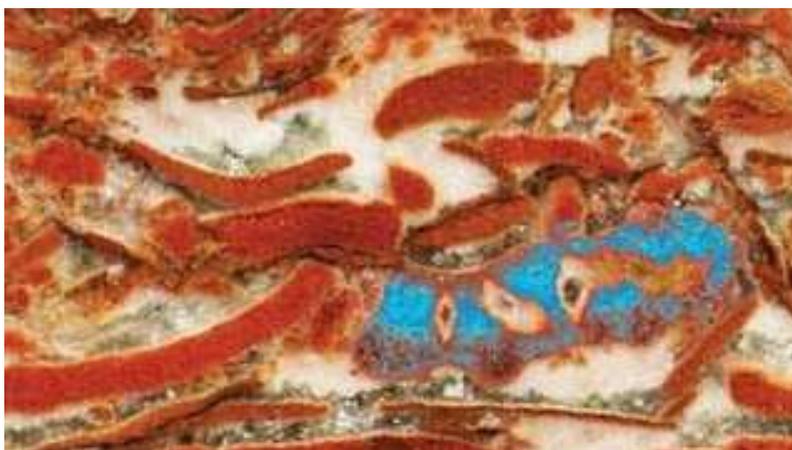


Spironucleus vortens, un DRIP flagelado parásito intestinal del pez angel
(cortesía de Dr. Sarah Poynton, publicado en Vetbook.wiki)

Pasemos unas hojas más del calendario. Nos adentramos en las profundidades de hace 900 millones de años. Algunos organismos unicelulares habían conseguido mejorar su capacidad de movilidad al disponer de un flagelo. Si lo consiguieron fue porque la presión medioambiental favorecía el tener una especie de látigo ¿les serviría para barrer más espacio en la búsqueda de alimento? ¿utilizarían ya algún pigmento fotorreceptor para orientarse? Lo que sí es cierto es que algunos aprovecharon la ventaja para juntarse con colegas, con los que eventualmente formaría colonias, como lo hacen los coanoflagelados de hoy en día. Otros encontraron sus oportunidades en otros entornos libres, fuera de las colonias, y siguieron adelante.

Entre los grupos coloniales, alguno supo hallar la ventaja precisa y evolucionó especializando a sus células, mientras seguía fijo en el fondo del mar. Este tipo de solución inició su camino hace unos 800 millones de años, llegando a su perfección con las esponjas, el primer organismo multicelular considerado ya animal. Se conocen⁽²⁹⁾ fósiles de ellas de hasta 650 millones de años.

Al mismo tiempo vivía otro animal similar a un coanoflagelado, con un cuerpo de varias células, que había adoptado una forma ameboide, muy pequeño, de tres milímetros quizás. No tenía un eje que le definiera parte delantera o trasera, aunque sí tendría idea de la orientación espacial y sabría ya lo que es una parte “ventral”, ya que se movía reptando sobre una especie de cabellera de pequeños cilios. Estas nuevas habilidades complejas le acercaban a la posesión de un sistema nervioso, pero aún no disponía de él. Apuntaba maneras de depredador como sus actuales descendientes los placozoos. Corría el entorno de hace 780 millones de años.



Fósiles de esponjas de hace 650 millones de años (Adam C. Maloof et al., 2010, Nature ⁽²⁹⁾)

De alguna manera, el pequeño predador encontró también la vía hacia el desarrollo “armamentístico”. Se abrieron dos caminos, uno con meta final en los ctenóforos, también conocidos como “peines de gelatina”, con una forma muy parecida a la de las medusas y que cazaba utilizando una sustancia pegajosa con la que sujetaba a sus presas. El otro camino comenzó a especializarse hace 700 millones de años, más o menos durante la macroglaciación “bola de nieve”, y se basó en los arpones venenosos, los mismos que mucho más tarde vemos que usan las anémonas y corales, y sus parientes las medusas y pólipos, los animales cnidaria. Unos eran animales fijos al suelo mientras que otros podían flotar y moverse entre dos aguas. Supusieron un paso evolutivo muy importante, ya que con ellos se habría inventado la boca/ano, un simple sistema nervioso e incluso algo semejante a ojos.

A una pequeña larva de alguno de estos animales, quizás el primer organismo de clara simetría bilateral, le bastó con seguir adelante hacia la vida parasitaria de los gusanos planos, animales sin ninguna cavidad

interior que contuviera los órganos especializados. Eso fue hace 630 millones de años, saliendo de otra gran glaciación, con el continente de Panotia formado.

Por la misma época, otra larva siguió caminos más “ambiciosos” hacia los organismos, esta vez sí, con cavidad interior, al principio aún con un solo orificio boca/año y más tarde con ambos diferenciados. 40 millones de años después el pequeño ameboide iniciaría la senda que le iba a transformar en un pequeño gusano. Probablemente con un par de ojos sensibles a la luz y la oscuridad, aunque sin capacidad para formar una imagen nítida. Esto último desde un punto de vista humano, puesto que para el gusano poseedor de este ojo primitivo sería como un milagro de la tecnología. Un pequeño gusano plano, de cuyo descendiente hablaremos cuando analicemos el Cámbrico, que se movía ya por el fondo del mar hace unos 570 años. Aún sin cerebro, aunque con ciertos ganglios nerviosos repartidos aquí y allá, y un rudimentario sistema hidráulico con agua de mar que haría las veces de sistema circulatorio y sangre. Tendría apéndices bucales que le ayudaban a la alimentación y un cuerpo en el que se apuntaba una segmentación (característica morfológica de la que hablaremos en el capítulo 24), aunque realmente no fuera así. Nadie hubiera dicho que estamos ante el común tatarabuelo de artrópodos, gusanos y moluscos.



Surcos de hace 565 millones de años, posiblemente dejados por un organismo semejante a una anémona, del yacimiento de Mistaken Point, Canadá (Fuente: Geology ⁽³⁰⁾, fair use)

En Mistaken Point, Terranova (Canadá) se han identificado⁽³⁰⁾ un total de 70 surcos que indican que algunas criaturas ya se arrastraban por el fondo de los océanos ediacarenses hace 565 millones de años. Las marcas indican que el animal o animales en cuestión tenían algún tipo de control muscular durante su locomoción que les permitía moverse en busca de comida o huir de sus enemigos. ¿Se trataba del mencionado tatarabuelo?

El camino de nuestro pequeño gusano plano se ramificó, iniciando los primeros pasos que le llevarían en un lejano futuro a crear las familias animales que conocemos hoy en día. La primera rama se dirigía hacia la aventura de éxito tan variada como la de los artrópodos (crustáceos, insectos, arácnidos y escorpiones), gusanos y moluscos. Otra rama se irradió con posterioridad hacia una nueva simetría, la radial, aunque conservando la bilateral en su estado larvario: el inicio del camino de los equinodermos, estrellas de mar, erizos y así. Una tercera rama de la radiación, y la más moderna, se dirigía resuelta hacia otro “invento” decisivo: la “ *cuerda dorsal* ”, un cuerpo flexible con forma de vara que se encuentra en todos los embriones de todos los cordados, un órgano primitivo del que derivó la varilla semirrígida gelatinosa u ósea que da soporte a muchos animales y que protegerá la principal fibra nerviosa de sus organismos. Tras desgajarse otra ramificación hacia los tunicados 5 millones de años después, el gusano con notocorda, que se movía nadando igual que un renacuajo, va engrosando la parte delantera de la misma, que adquiere la funcionalidad de un cerebro sencillo.



El anfioxus, Branchiostoma lanceolatum, un animal actual que bien puede ser una copia congelada en el tiempo de aquel animal que hace 560 millones de años abrió la puerta a los vertebrados (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

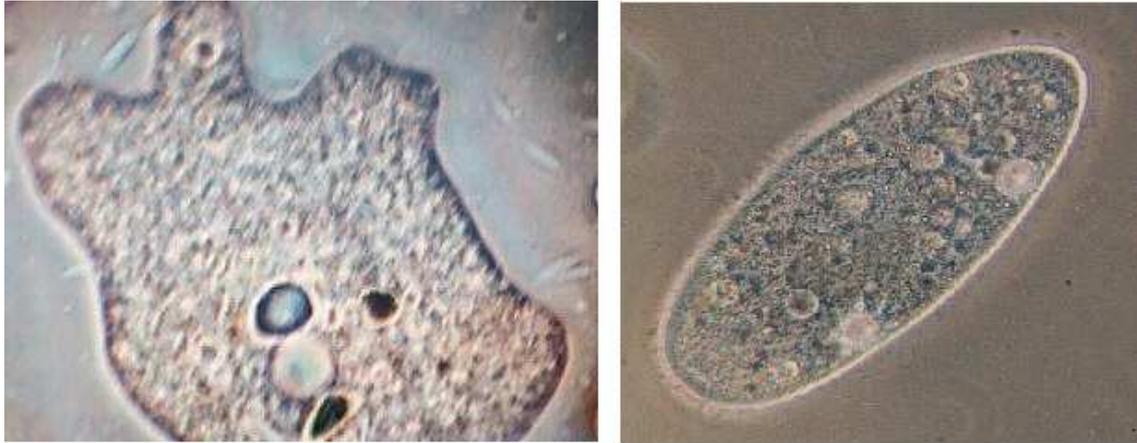
Entramos en los últimos 560 millones de años, momento en el que se ramifica en el árbol de la vida el proyecto elemental de un ser brillante, semejante al *anfioxos* actual, un “boquerón” de menos de cinco centímetros, plano, sin cráneo ni cerebro diferenciado, ni mandíbulas, ni esqueleto. Un apunte de cuerda cartilaginosa se alinea longitudinalmente en su parte superior. Un par de puntos con pigmentos fotosensibles que le hacen de ojos y unos arcos braquiales a través de los que comunicaba el mar con su espacio interior. En sus fósiles se detectan músculos como para nadar con un movimiento ondulatorio similar a los peces. Bien pudiera ser ésta que viene a continuación la imagen del pariente común de vertebrados y cefalocordados. Seguramente el *Homo sapiens* comparte más de un gen con este fideo marino.

La escena en la frontera del Proterozoico con el Cámbrico

Dejemos el árbol filogenético que nos ha traído hasta ese último abuelo ancestral para fijarnos en lo que realmente pasaba en las aguas de aquella época en que irrumpía el Cámbrico. Desde el final de los episodios de grandes glaciaciones sobre el planeta, la Tierra “*Bola de nieve*”, con la rotura del continente Panotia y consiguiente incremento del vulcanismo la dinámica de los océanos había cambiado. Los elevados niveles de CO₂ habían acelerado la meteorización de las nuevas placas continentales llenando de ricos nutrientes fosfatados las poco profundas aguas entre tierras. El oxígeno también había incrementado su participación en la atmósfera y en las aguas, de forma que la capa de ozono era ya una realidad protectora, por lo que en las aguas someras abundaba el fitoplancton que al morir caía hasta los fondos. La consecuencia es que en los mares había mucha comida, arriba y abajo. Poco a poco el mundo se vio repleto de vida con multitud de seres que recorrían sus propias sendas: zapadores y pacedores en los fondos; flotadores en la superficie. Y tras ellos los depredadores, preparando en su conjunto un nuevo ecosistema marino que iba a dejar al planeta en la puerta de la aventura de los vertebrados. No había artrópodos, no había plantas superiores. No había aún insectos, aunque su camino había empezado la aventura 30 millones de años antes.

Como decimos, los organismos vivos en este momento frontera debían ser abundantes, en su gran mayoría bacterias o pequeños protozoos como los habitantes del mundo planctónico, algas, hongos y diminutos protistas, animales moviéndose gracias a sus cilios o mediante deformaciones de sus cuerpos como las amebas. En los fondos comenzaban los arrecifes de arqueociatos, unos animalillos con forma de copa, en donde empezaban a

verse corales. Por encima de ellos en la cadena trófica se encontraban las esponjas, de las que se conoce su antigua existencia gracias al análisis químico de rocas que datan de hace 635 millones de años, en las que se ha descubierto una forma modificada de colesterol que es producida sólo por ellas. En estos momentos de bullicio innovador, junto a toda esta biota, quizás en algún recóndito rincón se iba apagando alguna reliquia residual de la fauna Ediacara.



A la izquierda una ameba y a la derecha un paramecio con su orla de cilios (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

A la esponja se le considera el primer metazoo, el ancestro común de los organismos superiores. Está fija en el fondo marino y consta de células que han adquirido una incipiente organización y especialización. Su organismo es completamente poroso y lleno de conductos y cavidades por donde circula el agua, que es absorbida a través de los múltiples orificios exteriores y expulsada a través de una gran abertura superior. El flujo del agua lo llevan a cabo unas células flageladas llamadas coanocitos. En las camarillas internas hay otras células que se encargan de absorber el alimento arrastrado por la corriente de agua, para después pasar a otras células encargadas de la digestión y transporte de nutrientes al resto del organismo. La rigidez estructural la consigue mediante una serie de espículas inorgánicas, cálcicas o silíceas.

Una de las características más sorprendentes de las esponjas es que la mayoría de las células que componen su cuerpo son “totipotentes”, es decir, pueden transformarse en cualquiera de los otros tipos celulares según las necesidades del animal: si se disgregan sus células -cosa que se puede conseguir en el laboratorio por medios mecánicos- y se las vuelve a poner juntas, reaparece de nuevo por sí sola una esponja adulta. Es más, si se desmenuzan dos esponjas de diferente especie poniendo el resultado de la

“molienda” en un mismo entorno, las células se reorganizan volviendo a reconstruir dos nuevos individuos separados. Debido a esto se considera que las esponjas sólo mantienen para sus organismos una estrategia basada en una simple organización celular, a diferencia del resto de metazoos, que lo hacen por tejidos.

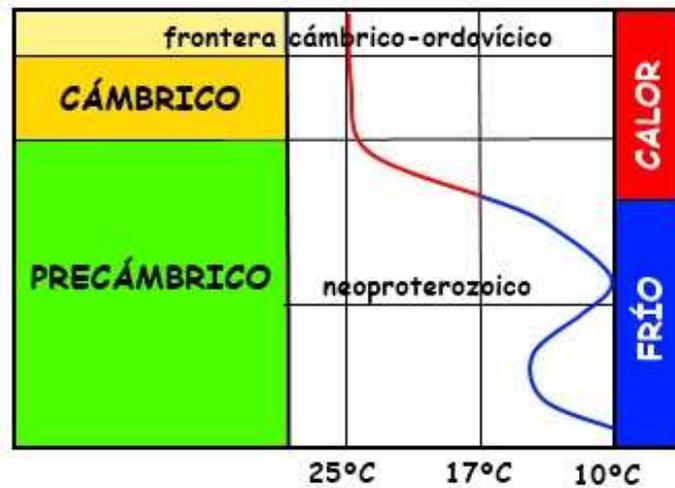


Esponja de mar (Wikimedia, dominio público)

Se trata, por tanto, del organismo que culmina el camino iniciado por las agrupaciones coloniales y que abre la puerta del mundo a los Animalia con mayúsculas, como un nuevo reino de los seres vivos. Junto a ellas, o bien aún fijas en el sustrato o posiblemente ya navegando a la deriva, se encontraban las medusas campaniformes y sus primos los pólipos, que evolutivamente se habían dado la vuelta para formar una copa, aferrándose al sustrato del fondo del mar. Y posiblemente les acompañaban también los ctenóforos. Los últimos estudios filogenéticos plantean la eventualidad de que estos pequeños animales gelatinosos, semejantes a las medusas, ocupan una posición evolutiva incluso anterior a la de las esponjas.

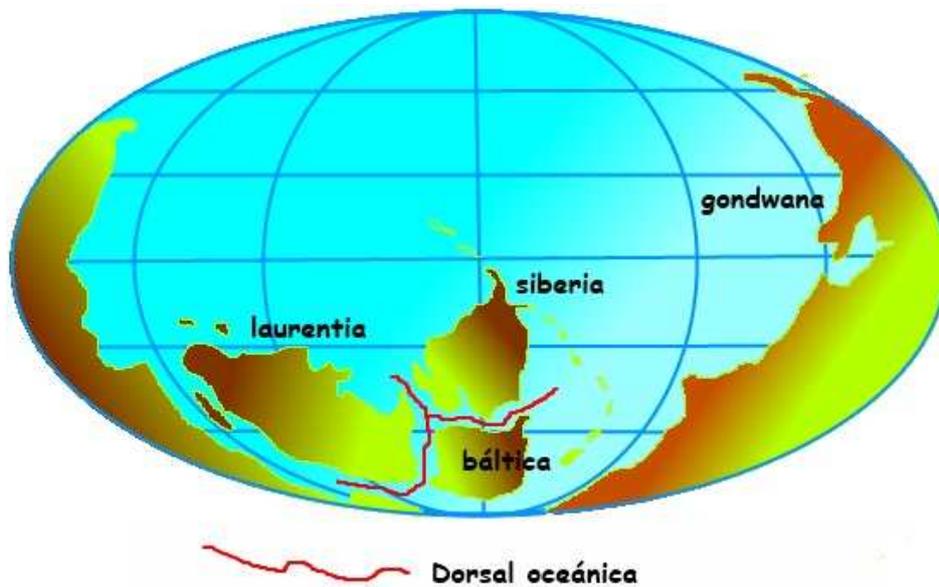
En estos años frontera se iban entretejiendo alianzas, probando alternativas y aprovechando oportunidades en un mar que cada vez disponía de un mayor contenido de oxígeno disuelto, mero reflejo del existente en la atmósfera, que había ido creciendo a lo largo de todo el Proterozoico.

En el momento de cambio de eón el clima se había recuperado de los episodios de glaciaciones que recubrieron la Tierra con una capa de hielo, y se disponía a comenzar un largo periodo cálido.



Estimación de temperaturas medias de la Tierra (a partir de Paleomap Project, Ch.R. Scotese⁽³¹⁾)

La mecánica de placas seguía modelando los perímetros de las tierras emergidas, haciendo que el antiguo continente de Panotia se hubiera disgregado por su flanco occidental. Tres nuevos continentes iban a la deriva abriendo canales y mares someros entre ellos, una excelente cuna que, unida a la bondad del clima y a los niveles altos de oxígeno, empujarían definitivamente la evolución de la Vida.



PROTEROZOICO TARDÍO 560 MM AA

En este momento de la narración nos encontramos en el punto en el que tenemos que abandonar una era crucial para el desarrollo de la Vida: el Proterozoico. Cuando comenzamos su historia podíamos haber pensado que este eón era un larguísimo y anodino periodo de la Vida, ya que no

íbamos a ver formas complejas, algo así como un periodo en el que se iba a desarrollar un catálogo de intensos acontecimientos pero casi sin relevancia. Hemos estado hablando del micromundo, de organismos unicelulares y de su química. Nada comparado con la vistosa conquista de la tierra por los tetrápodos, con la exuberante evolución de los dinosaurios o con el misterioso desarrollo del cerebro humano. El Proterozoico acaba “pobremente”, con una fauna extinta, la ediacara, y con una fauna minúscula, la de las pequeñas conchas (de las que hablaremos en el capítulo 18), y alguna esponja. ¡El inminente Cámbrico, en cambio, eso sí que va a ser un buen espectáculo!

Sin embargo tras un largo viaje de geología, climatología y biología de casi 1.500 millones de años, durante el que hemos hecho muchas incursiones a la teoría de la Vida, comprendemos lo que fue el Proterozoico en realidad: la esforzada concatenación de circunstancias casuales que preparó el atrezo absolutamente necesario para que el Cámbrico y las siguientes eras se lucieran. De los seres procariotas a los eucariotas, de la reproducción asexual a la sexual, del pequeño tamaño al grande, del organismo aislado al cooperante, de unas células multifuncionales a células especializadas... todo ello se produjo en el Proterozoico.

Antes de zambullirnos en las exuberancias del Cámbrico, en el siguiente capítulo haremos de nuevo un paréntesis teórico para hablar de ese concepto que ha salido y va a salir tanto en nuestro relato: los árboles filogenéticos de la Vida.

17. Fin del Proterozoico. Paréntesis filogenético

A lo largo de los capítulos anteriores nos hemos paseado por unos 4.000 millones de años de biosfera. Hemos contemplado cómo a través de un camino continuo la simple química de átomos y moléculas se iba convirtiendo en algo cada vez más complejo que llamamos bioquímica y, a fin de cuentas, Vida. Desde un principio los elementos primordiales seguían escuetamente en sus interrelaciones los dictámenes de la segunda ley de la Termodinámica, buscando siempre una situación de estabilidad que encontraban en estructuras que comportaban un mínimo de energía. Pero la creciente complejidad les llevó a formar intrincados sistemas químicos en los que la anterior estabilidad termodinámica ya no era el objetivo final. Sin faltar a la segunda ley mencionada, estos sistemas adoptaban comportamientos dinámicos que los llevaban hasta posiciones que rozaban la inestabilidad, en donde se mantenían gracias a una nueva habilidad adquirida: gestionar la energía.

Así, de una química de estabilidad termodinámica pasaron a una química de inestabilidad dinámica, en donde se premiaba la eficiencia en el mantenimiento de la maquinaria. Quien lo hiciera mejor sobreviviría más. Quien más habilidades obtuviera, lo que se plasmaba en una mayor complejidad y un mayor orden interno, podría jugar con ventaja. Se pasó de la química “conformista”, en donde la “ambición” de los actores era la mínima energía, a una química activa en donde la “ambición” de los sistemas era sobrevivir más que el vecino en un entorno donde funciona la replicación y la competencia. Y esta química activa, sin lugar a dudas, perdió su identidad y se confundió con la Vida. Lo ha expresado de forma perfecta el biólogo australiano Addy Pross en un libro que recomiendo: “*What is Life?: How Chemistry Becomes Biology*”.

Hasta ahora el viaje a lomos de la Química nos ha llevado desde el organismo más elemental hasta el que poseía ya unas habilidades tales como la multicelularidad e incluso la especialización de sus células en tejidos funcionales. Parece como si ya quedara poco, tan sólo unos 542 millones de años.

Pero no va a ser así. Nos queda mucha historia por delante. En el último eón, el Fanerozoico, con sus 542 millones de años, no sólo pasaron muchas

cosas y se desarrollaron muchos avances, sino que por suerte hay muchas pistas de lo que pasó. El registro fósil, dada lógicamente la “juventud” de los restos, es muy abundante. Pero voy a dejar el hilo de la curiosidad en el aire.

Antes de entrar en el detalle de esta época de florecimiento exponencial, voy a hacer un nuevo paréntesis teórico, que espero os guste por su importancia en la descripción y desarrollo de esta ciencia que es la Paleontología. Hoy nos dedicaremos a dar unas pinceladas sobre la *clasificación filogenética*.

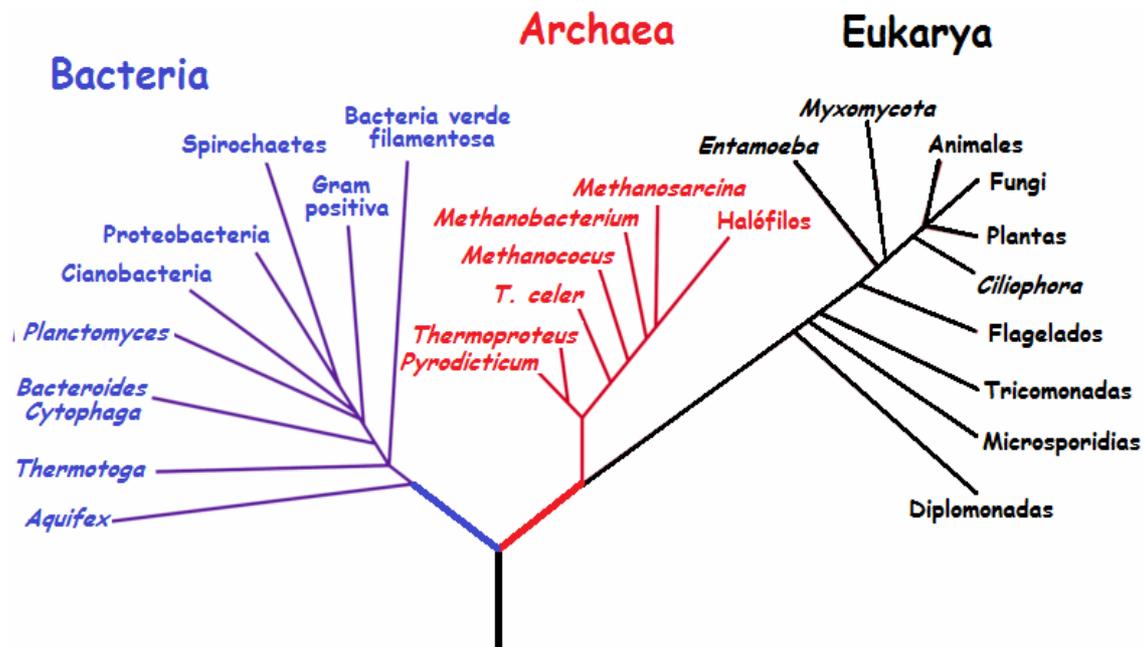
Nos encontramos a finales del Proterozoico cuando ya se había tramado una red de divergencias evolutivas, como nos enseñó Richard Dawkins en la entrada anterior, que nos llevarán a las formas animales actuales.

Con aquellos mimbres y mediante la selección de los que mejor se iban adaptando a las presiones ambientales, la Evolución con mayúscula podía iniciar las tareas de completar **el árbol de la Vida**, hasta ahora compuesto simplemente por las ramificaciones de las familias bacterianas. Se habían asentado las bases necesarias para que comenzara a expandirse el abanico de las especies, ampliando, complicando, haciendo cada vez más espesas las ramificaciones, cubriéndolas de nuevos brotes verdes... y secando a la mayoría de ellos. Se estima en mil millones el número de especies que han vivido desde los inicios sobre la Tierra, aunque tan sólo conocemos unas 300.000 especies fósiles y sólo diez millones las que la pueblan hoy.

Los brotes finales del árbol filogenético son las especies. El concepto biológico de especie lo definió el notable biólogo alemán Ernst Mayr ya en 1942, según el cual una especie es un grupo natural de individuos que pueden cruzarse entre sí, pero que están aislados reproductivamente de otros grupos afines. Él mismo reconoció que esta definición entraba de refilón para definir a organismos asexuados, pero el concepto tal como lo estableció ha tenido un gran éxito y es el que entiende casi todo el mundo.

El afán clasificatorio de los humanos nos ha llevado a intentar encontrar el orden en los seres vivos. Carlos Linneo fue posiblemente el primero que lo consiguió de forma inteligente, dejando sus ideas en el libro “*Systema naturae*” (1758). Muchos han seguido a Linneo, y a medida que el conocimiento se hacía mayor, las bases de clasificación se han tenido que ir cambiando. Y como en toda actividad humana, en este campo también ha habido una viva polémica sobre cómo se deben clasificar los organismos vivos que son y que han sido. De todas formas no vamos a

entrar en este detalle pues creo que es intrascendente para nuestros propósitos.



Árbol filogenético de la Vida (Wikimedia, dominio público)

Lo realmente importante es que, a pesar de las divergencias y a pesar de lo que costó aceptar que bacterias y arqueas tenían historias evolutivas bastante distintas, hoy en día se maneja una división de los seres vivos en tres **Dominios**: Bacteria, Archaea y Eukarya. La figura anterior representa un reconocido árbol filogenético basado en esta última clasificación. A partir del próximo capítulo sobre el Cámbrico comenzaremos a ver y a disfrutar de la actuación del magnífico rol de actores que coronan su copa.

Un árbol filogenético como el anterior no tiene nada que ver con la datación exacta de la aparición de especies, sino que su objetivo simplemente es clasificar según el momento de aparición en escena, dando una idea de quién es el antecesor y quién el que le sigue. El punto de inicio es la base de un tronco común por donde deambuló un ser vivo padre universal de todos los siguientes, para con posterioridad irse expandiendo en múltiples ramificaciones que representan también el historial de ancestros comunes. Es sorprendente la gran importancia de las bacterias en este árbol, que se difuminan si en vez de Dominios hablamos de las antiguas clasificaciones según **Reinos**, que suman seis: a los dos de las Bacterias y Arqueas, las eucariotas añaden cuatro más: Protistas (básicamente eucariotas unicelulares), Hongos, Plantas y Animales.

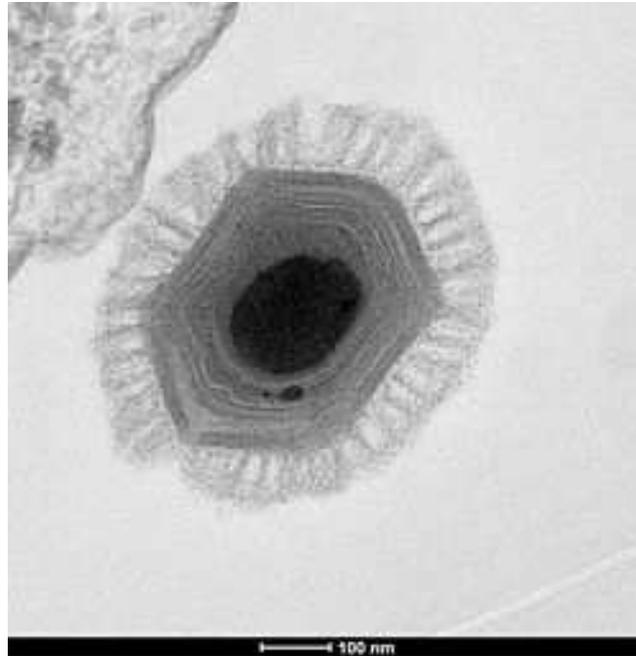
Haré una mención a la categoría de división que queda inmediatamente por debajo de Reino, ya que es un concepto importante que asomará en las siguientes entradas en las que se desarrollará la “explosión de vida” ocurrida en el Cámbrico temprano. Se trata de los **filos**, las agrupaciones de animales basadas en su plan general de organización corporal, es decir, atendiendo a los planos constructivos de detalle de sus cuerpos. Aunque hay unos cuarenta filos, la mayoría de animales se encuentran en cuatro de ellos. Los artrópodos agrupan el 80% del total de especies, los moluscos un 7%, los cordados, entre los que nos encontramos los vertebrados, un 4,5%, y los gusanos de todo tipo otro 4,5%. En estos cálculos, las bacterias procariotas no entran. Injustamente, el ser pequeño e invisible no da muchos puntos en el ranking de la popularidad.

Pero la Vida es una caja de sorpresas. La clasificación está definida pero, como todo en el mundo de la ciencia, nada es inmutable. Los últimos estudios sobre unos extraordinarios seres conocidos como Macrovirus o virus apuntan a que la amable figura del árbol filogenético quizás deba hacer un hueco a tan extraordinario personaje, hasta hoy fuera del club de los organismos vivos.

Los virus son unas pequeñas máquinas que están en el límite entre el ser vivo y un sofisticado gadget bioquímico, aunque el pensamiento más común es que realmente son esto último. Para entenderlos hay que saber que se les puede describir en pocas palabras como una molécula genética, tipo ARN, y una cápsula exterior proteínica que le sirve de nave espacial. En su ARN está la codificación para su propia replicación, pero no es capaz de sintetizar por sí mismo las enzimas necesarias para ello. Curiosamente sí es capaz de organizar la síntesis de dos familias de proteínas, una, con las que fabrica su cápsula exterior, y otra, con las que perfora las paredes de otras células y penetra en sus núcleos. Claramente navega, se ancla sobre una célula, la penetra y engasta su material genético en el ADN de la célula hospedadora. Allí su ARN se replica a la par del ADN de la célula (y gracias a éste), comenzando a sintetizar proteínas dañinas para el hospedador, con las que construye nuevos virus hijos que salen del citoplasma de la célula, normalmente destrozando su membrana, para reiniciar nuevos periplos.

Lo sorprendente empezó durante el estudio de un brote de neumonía en Inglaterra, allá por los inicios de los 90's del siglo pasado. Buscando la bacteria causante se encontró a *Bradfordcoccus*. En microbiología clínica se utiliza la pista de la macromolécula ADN ribosómico 16 S para identificar bacterias: es el recurso más sencillo. Pues bien, nuestra

amiga carecía de esta pieza de material genético. Misterio, misterio. Entonces, al observarla con más precisión, los patólogos se percataron de que no era una bacteria sino un virus.

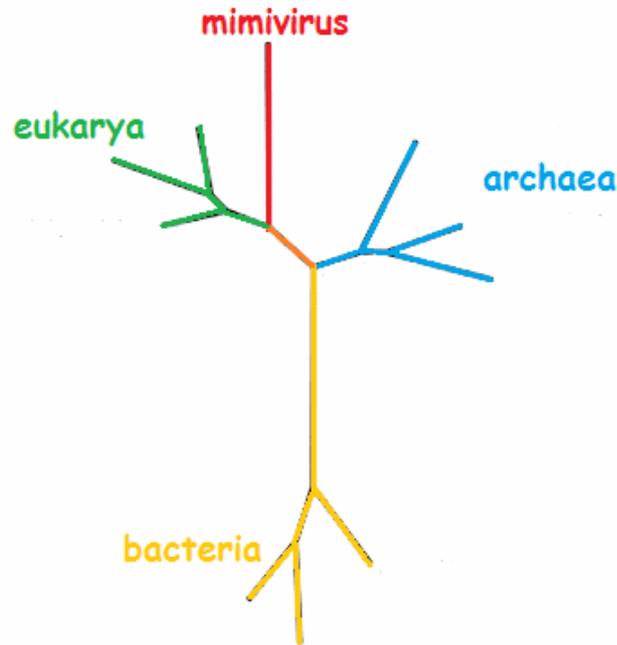


Megavirus chilensis (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Con posterioridad se han descubierto seres semejantes, como el *Mimivirus*, el *Megavirus*, el *Pithovirus* o el *CroV*. Pero estos “señores” aún sorprendieron más: a pesar de ser considerados virus, ellos mismos eran capaces, con su propio ARN, con sus propios genes, de codificar funciones que siempre se habían considerado propias de las células, sintetizando a través de ellos diversas proteínas: nada más alejado a lo que es un virus.

El problema es ¿cómo consiguieron estos virus gigantes los genes que les facilitaban tales funcionalidades y que no les correspondían? Hay varias interpretaciones. Una dice que por transferencia horizontal de genes, tal como hacen muchas procariotas. Otras, que durante un proceso de simbiosis, de mecanismo semejante al que creó a las mitocondrias, fue perdiendo la práctica totalidad de su genoma quedando como lo que ahora vemos. Esta última interpretación resulta la más probable.

Todo ello necesariamente ha suscitado un debate científico para tratar de explicar el origen de los virus gigantes y la necesidad de redefinir lo que es un “virus”. Incluso algunos autores afirman que corresponderían a un cuarto dominio de la Vida. Quién sabe si en un futuro el árbol de la Vida presentará un nuevo aspecto. Como el siguiente:



Árbol de la vida con cuatro dominios

¿Dónde queda el hombre? Desde la lejanía que nos da la perspectiva del Proterozoico, resulta claramente meridiana nuestra posición en el árbol filogenético de la Vida: un pequeño brote, que ni está dibujado, de una pequeña rama del reino Animal, en el dominio Eukarya. Un brote que se pierde en el inmenso mar de los números. Transcribo al naturalista Colin Tudge de su libro *“The variety of life”*:

“El número de especies que han vivido en la Tierra desde que comenzó la Vida fácilmente puede llegar a la cifra de... 4 millones de millones... prácticamente mil especies por cada año de existencia de la Vida sobre la Tierra. Desde luego esta estimación puede estar equivocada en un factor de un orden de magnitud, o incluso por varios órdenes de magnitud. Pero incluso si la cifra fuera exagerada un millón de veces, el total sigue siendo inmenso, demasiado vasto para ser aprehendido por ninguna mente humana”.

Una especie perdida entre millones de ellas, esto es el *Homo sapiens*.

Puesto correctamente el foco, abramos ahora el zoom: llega el Fanerozoico.

18. La biota del Cámbrico

Llevamos ya en nuestras alforjas un extenso periodo de tiempo de 4.038 millones de años, que agrupa a los tres primeros eones de nuestro planeta. A partir de hoy ya sólo vamos a movernos por el último de ellos, el Fanerozoico, el cual iremos despiezando con más meticulosidad dada la cantidad de información que disponemos de este periodo. No en balde es la etapa más próxima y por tanto con más datos disponibles.

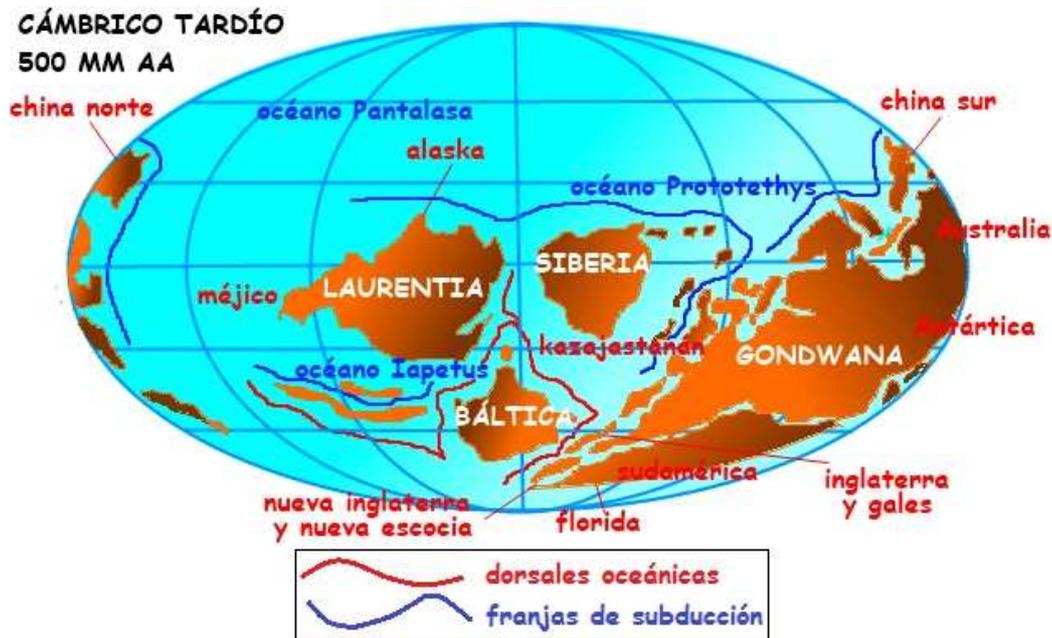
El Fanerozoico se divide en tres grandes eras, Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico, siguiendo el orden geológico de más antigua a más moderna. Cada una de ellas, a su vez, se divide en periodos. En este capítulo comenzaremos con el primero del Paleozoico: el Cámbrico, que se prolongó desde hace 542 hasta hace 488 millones de años.



Los primeros restos geológicos de esta época se estudiaron en Gales, por eso le nombraron Cámbrico pues en gaélico a Gales se le llama Cambria. El continente Panotia se estaba descomponiendo y la rica fauna Ediacara había desaparecido dando paso a la “explosión” de unas nuevas formas de Vida con características que se han prorrogado hasta la época actual. Los organismos son exclusivos del mar: bacterias, hongos, plantas y animales. Estos últimos van a descubrir el uso de materiales sólidos para crear protección y aportar sostén a sus blandos organismos.

La ruptura de Panotia y posterior deriva continental hizo que en esta época hubiera un gran continente, Gondwana, en posición ecuador-polo sur, del que se habían desgajado por el oeste los continentes de Laurentia, Siberia y Báltica, en posiciones ecuatoriales y tropicales, que llevaban su propia

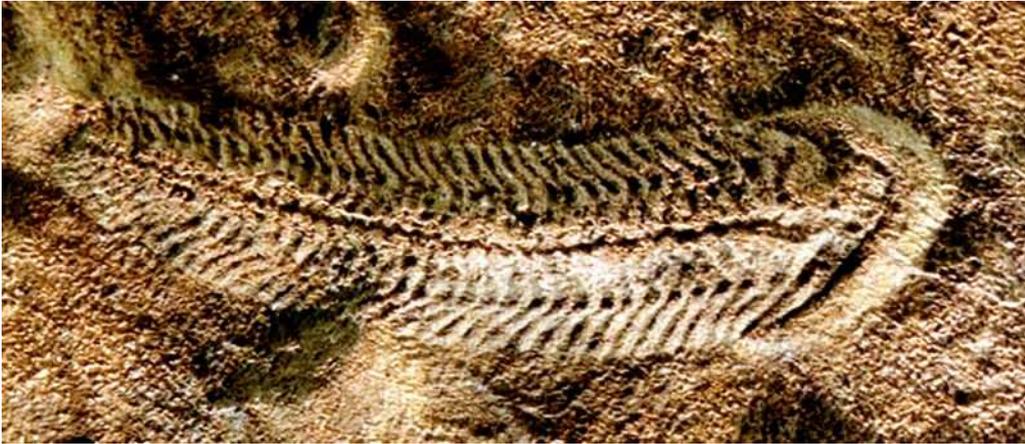
deriva de separación motorizada por una dorsal oceánica en forma de Y invertida. Toda la costa norte de Gondwana era una zona de subducción en donde iban creciendo arcos de islas volcánicas.



No se sabe muy bien cuál pudo ser el clima del Cámbrico aunque se supone que tuvo temperaturas cálidas, ni muy altas ni muy bajas. Los abundantes sedimentos calizos parecen asegurar esta situación climática. En todo el periodo no hay evidencias de glaciaciones, lo cual refuerza la hipótesis de temperaturas benignas.

La Vida continuaba en los mares. Sus fondos más profundos estarían recubiertos de sedimentos silíceos y calcáreos. En la proximidad de la línea costera estaba el roquedal, firme o disgregado. Los arrecifes hacía tiempo que habían aparecido en la franja de aguas tropicales en donde habían adoptado formas globulares, de abanico o tubulares, más o menos delicadas según la profundidad. Al comienzo de esta época estaban formados por esponjas o animales parecidos, arqueociatos y algas calcáreas. Más tarde a estos tres tipos de organismos se les unirían los corales. Se seguían construyendo formaciones de estromatolitos, aunque ahora no con tanta facilidad debido a que alguno de los nuevos animales que iban apareciendo ya comenzaba a alimentarse de sus capas bacterianas. La fauna Ediacara había desaparecido hacía unos millones de años y no se disponen de muchos restos fósiles que la enlacen con la cámbrica. Quizás podamos considerar a los individuos de los géneros Parvacorina y Springgina como los que firmaron la transición, y que suponemos pudieron ser los ancestros de los trilobites, unos artrópodos de

la gran explosión de vida a la que estaba llegando. Sabemos también que las esponjas estaban allí, pero no mucho más. A lo mejor la vida estaba constituida por seres de cuerpo blando, con una probabilidad muy baja de fosilizar, o eran microscópicos. O quizás aún nos falta por descubrir el yacimiento fósil definitivo que complete la línea evolutiva.



Spriggina flounensis, animal de finales del Ediacárico que se postula como enlace con los artrópodos del Cámbrico (Wikimedia, CC BY 2.5)

Los fondos marinos y las orillas someras debían estar cubiertos de tapetes bacterianos y de algas. Se acepta de manera general que no existían plantas sobre la tierra en esta época. Aunque la datación molecular nos sugiere que las plantas terrestres más simples se segregaron pronto del árbol evolutivo, en el Precámbrico, hace unos 700 millones de años, y los hongos hace 1.000 millones de años, también en el Precámbrico. Es posible que un manto formado por hongos, algas y líquenes ya cubriera ciertas zonas de la Tierra. Muchas incógnitas y mucho por descubrir de la Vida en estos momentos.

En poco tiempo el panorama cambió.

La expansión de la biosfera

A principios del Cámbrico se produce una tremenda y rápida diversificación de formas vivas. Un fenómeno que hoy se sabe fue de carácter global en todo el planeta y que se produjo a lo largo de un periodo geológicamente mínimo: unos diez millones de años. Se la conoce como **la explosión del Cámbrico**.

A través de un juego de éxitos y errores, que iban siendo permanentemente calibrados por criterios evolutivos, se inventaron nuevas estrategias de

alimentación, pasando de pacer microorganismos al azar a una búsqueda activa del alimento. Los niveles de oxígeno en las aguas habían sobrepasado el límite necesario para que los organismos pudieran metabolizar colágeno, proteína fundamental para disponer de un organismo rígido y flexible: la fauna ediacara podía ser superada. También con esos niveles de oxígeno los organismos podían aprovechar el calcio y el silicio disueltos en el medio para usos particulares casi inéditos. Los organismos se van a ir haciendo más complejos que las sencillas esponjas. Recordemos sus flagelados coanocitos. La naturaleza aprovechó la oportunidad de fortalecer los simples cilios, incluso uniéndolos formando una membrana que sería vibrátil, con lo que se inventaba un sólido aparato locomotor: la carrera armamentística para la predación acababa de hacer acto de presencia.

El buen clima y la fuerte disgregación de terrenos continentales estaban favoreciendo la precipitación de calizas en los mares y el “envenenamiento” de sus aguas con iones perjudiciales para el metabolismo, lo que impulsó a los organismos vivos a desarrollar un bombeo de estos minerales fuera de sus cuerpos. Por este procedimiento a algunos se les fueron desarrollando en su superficie escamas y espículas calcáreas o silíceas que inicialmente les ayudarían a protegerse. Quizás como subproducto, y gracias a que en el proceso pudo generarse un diseño mecánico que acabó formando esqueletos tanto internos como externos, la acumulación de iones contribuyó a mejorar los elementos de sostén y a que la movilidad pudiera realizarse con mayor soltura. Al permanente espolvoreado calizo y silíceo de las aguas se le unió el aprovechamiento de biopolímeros tales como la quitina o el colágeno. Caparazones, cáscaras, espículas, tejidos más consistentes, cartílagos... aparecieron por doquier durante el Cámbrico. Fue el inicio de una gran carrera armamentística: a un predador más hábil le sucedía una presa más protegida, que obligaba a incrementar las habilidades de los predadores... y así en continua progresión. Patas, ojos, mandíbulas,... un sinfín de nuevas armas. Éste fue el gran motor de la expansión de vida en el Cámbrico: se pasó de esperar a que el alimento viniera gratuitamente a buscarlo activamente.

Los primeros escalones de la cadena alimentaria comenzarían en las algas y los tapetes bacterianos, entre los cuales pulularían pequeñas larvas de animales. Los suelos oceánicos estarían repletos de limos con detritos, restos de la vida que sobrenadaba. El plancton flotante o suspendido entre dos aguas había sido abundante con anterioridad. Pero en estos momentos estaban apareciendo nuevos animales con ojos para decidir dónde ir, con asomo de mandíbulas masticadoras que les permitían pacer en las praderas

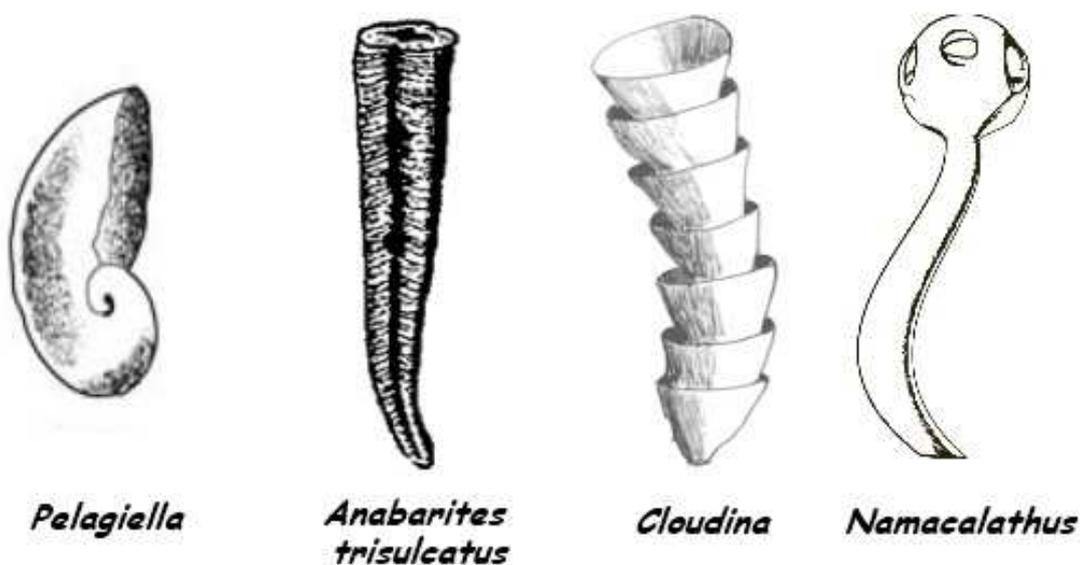
submarinas, animales con rudimentarias paletas con las que escarbaba en el limo, seres con facilidades para reptar o nadar que cubrían cualquier nicho en donde pudiera haber alimento. Gusanos que se enterraban en el fango, gusanos con numerosas cerdas móviles, artrópodos acorazados y con terribles “mandíbulas”, cefalópodos ágiles y voraces, todos conviviendo con los estáticos moluscos.

Según comenta el paleontólogo norteamericano Stephen Jay Gould acerca de la explosión del Cámbrico, parece como si en aquel momento la Vida manifestara libremente su potencial, haciendo realidad un inmenso abanico de posibilidades, todas con exquisita funcionalidad. Realmente fue como abrir una caja de sorpresas en donde se encontraban almacenadas una gran variedad de piezas dispuestas para ser utilizadas, para diseñar y montar cada una de las partes vitales de un organismo: cien formas de boca, cien de patas, cien de cabezas... mézclase y tómese una de cada y hágase un animal cámbrico. Las variantes montadas que sean viables encontrarán su encaje en el medio ambiente adoptando un hábitat particular y una posición en la cadena trófica. Desde el fondo marino a las aguas intermedias, desde ser detritívoros a ser auténticos depredadores. Una panoplia completa. Y todo en el “suspiro” de tan sólo diez millones de años.

Parece como si en aquel momento cualquier solución, en cuanto a formas y funciones, que tuviera posibilidad de éxito era inevitable y tenía que surgir espontáneamente en la naturaleza. Es el sino de la evolución ya que sin duda el esplendor de la variación siempre se repetirá, con mayor o menor ímpetu, tantas veces como lo ordenen las circunstancias de cada momento. Algo parecido a lo que estamos viendo durante el Cámbrico sucedió unos 500 millones de años más tarde en el Cenozoico, cuando África, Sudamérica y Australia navegaban a la deriva como inmensas islas solitarias. Sobre sus geografías las faunas de mamíferos, en unos casos placentarios y en otros marsupiales, evolucionaron de forma independiente y ¿sorprendentemente? casi siempre adoptando soluciones convergentes. En cada uno de estos continentes la evolución llevó a colonizar nichos semejantes con animales de fenotipos semejantes y ello sin tener ninguna conexión familiar inmediata. El lobo euroasiático y el lobo de Tasmania, el topo y su homólogo marsupial, el oso hormiguero y el numbat marsupial australiano, el armadillo sudamericano y el pangolín afroasiático, y así muchos más ejemplos. La Vida es una activa maquinaria llena de iniciativa que en donde encuentra un resquicio, allí se instala.

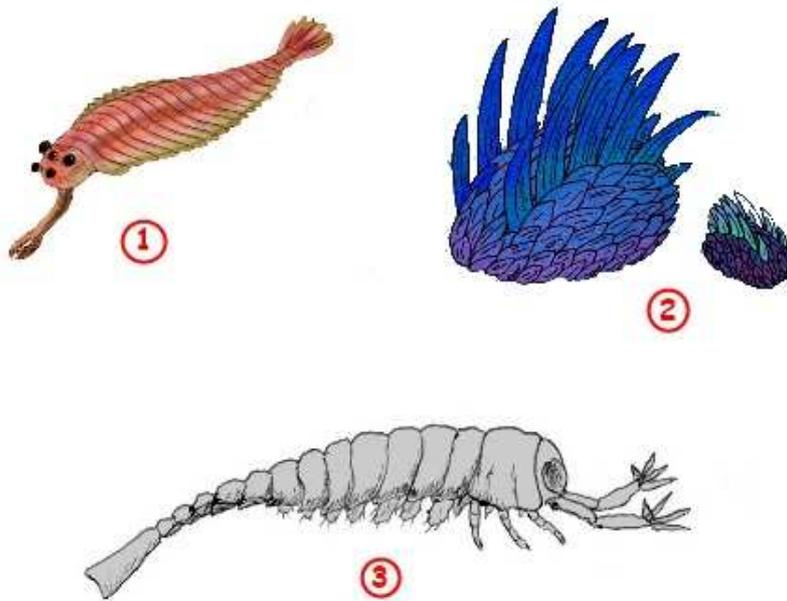
Es muy posible que todo se originara con los Pequeños Fósiles con Concha (*Small Shelly Fossils*) conocidos también como la fauna Tomotiense.

Prácticamente son los primeros restos de esqueletos mineralizados que aparecen en el registro fósil, al comienzo del período Cámbrico. Los restos consisten en escamitas, espículas, tubos y conchas, que bien pudieran ser elementos de organismos mayores en una época de esqueletización temprana, aunque otros parecen ser conchas individuales pertenecientes a organismos de pequeño tamaño. Seguramente las rarezas estructurales de esta fauna corresponden a planes corporales que aparecieron rápidamente y murieron igual de rápido sin dejar supervivientes, como ya les había sucedido a los organismos de Ediacara. De hecho, vimos en un capítulo anterior que, al igual que estos últimos, se extinguieron coincidiendo con una excursión negativa del $\delta^{13}\text{C}$.



Variación de los Small Shelly Fossiles (a partir de Fossil.wiki, Paleos.com, fair use y Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Más allá de esta pequeña fauna las formas más avanzadas de organismos vivos se conocen en gran medida gracias a unos pocos yacimientos extremadamente ricos en fósiles. Uno de los más importantes es la “catedral” de Burgess Shale, en la Columbia Británica, en Canadá, sobre las laderas de las Montañas Rocosas, que contiene fósiles con antigüedad comprendida en la franja de 540 a 530 millones de años atrás. En aquellos momentos sólo el noreste de Canadá asomaba la nariz por encima del agua en el continente de Laurentia. El resto era el mar. Burgess Shale es un verdadero cuerno de la abundancia de formas animales, gracias a la que sabemos mucho de la fauna del Cámbrico. Artrópodos, cordados, gusanos, esponjas y otros animales desaparecidos.



Fauna de filos encontrados en Burgess Shale que en la actualidad no tienen representantes vivos: 1-Opabinia, 2-Viwaxia y 3-Yohoia (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Lo mismo podemos decir del yacimiento formado por los esquistos de Maotianshan en China. Su antigüedad es de 522 millones de años y en aquel momento la región estaba sumergida en la línea del ecuador. El inicio de su investigación es posterior a la de Burgess Shale y por tanto aún quedan muchos misterios por descubrir, aunque, como en el yacimiento canadiense, la diversidad es asimismo fantástica.

Los múltiples estudios realizados a partir de estos yacimientos han dejado encima de la mesa de la evolución una gran pregunta: ¿Cómo en tan poco tiempo, geológicamente hablando, aparecen todos los planes de diseño corporal de los organismos, entre ellos los mismos, y no más, de los que vemos en los animales de hoy en día? ¿por qué en los siguientes 525 millones de años no se han innovado nuevos diseños y sólo se han modificado los que aparecen en los yacimientos del Cámbrico? ¿por qué aparece el tipo de fósiles que aparece? ¿cuáles fueron los eslabones contemporáneos de la fauna ediacara o de la de las pequeñas conchas, ambas extintas, que llegaron hasta las formas complejas del Cámbrico?

Hay teorías que explican esta rápida expansión de la diversidad apoyándose en el argumento de la presión de la predación y la competencia. El hecho de que hubiera cada vez más formas de animales complejos, que se iban armando defensiva y ofensivamente de forma

progresiva, hizo que la biosfera animal buscara múltiples soluciones y salidas a esta presión, haciendo evolucionar rápidamente desde las formas simples los múltiples y diferentes planes estructurales, lo que llamamos filos, de los organismos de comienzos del Cámbrico.

Podríamos pensar también como idea general que a partir de un espacio vacío es más fácil el rellenarlo. No obstante algunos expertos se resisten a pensar, como es el caso de S. J. Gould, que el éxito de la “explosión” fuera tan sólo consecuencia del estado “virginal” y sin contaminación histórica en que se encontraba el medioambiente cuando todo se inició. Esto sólo sería una parte. En capítulos posteriores veremos que se dieron grandes extinciones, como la del Pérmico-Triásico en la que desaparecieron casi el 95% de las especies marinas, tras las que sabemos que la biosfera quedó casi despoblada, por lo que podemos pensar que de nuevo se habría generado un estado casi “virginal”. Y lo que es cierto es que después de este repetido barrido y casi puesta a cero no se observa ninguna nueva explosión de diversidad. Por tanto, no está tan claro que el extraordinario impulso que se produjo en el Cámbrico fuera sólo consecuencia de que los nichos ecológicos se quedaron vacíos, en una situación donde entonces pudo manifestarse la Vida con toda su potencialidad.

Debieron concurrir además otras circunstancias. Los genes de los pocos animales que iniciaron el camino tras el fracaso de los ediacarenses, debían mantener unas interrelaciones más sencillas que la que mantienen estos mismos tipos de genes hoy en día. Sus duplicaciones en el ADN con el paso de los millones de años y el posterior cambio funcional, enmarañó e hizo más dificultosas sus formas de expresión. Sin embargo, en aquella época debían ser más “libres”, estar menos condicionados, y por tanto con un alto potencial de expresar un variado escaparate de realidades. Por otro lado, el hecho de haber tenido que ser tan pocos los animales progenitores en las generaciones iniciales del Cámbrico nos permite pensar que el acervo genético de la época era “escaso” y compartido por todos los organismos que iban surgiendo de nuevo: todos dispondrían de parecidas estructuras de expresión fenotípica. De ahí la gran mezcla de soluciones particulares entre todos los nuevos modelos animales de inicios del eón Fanerozoico. Multitud de filos que compartían soluciones estructurales, a veces en distintas partes de sus organismos, dentro de unos patrones corporales que no tenían nada que ver unos con otro: patas articuladas, ojos articulados, cuerpos articulados, antenas articuladas.

Después de estos 10 millones de años iniciales ya no hubo más inventiva, sólo aniquilación de aquellas formas a las que en cada momento

biogeológico las circunstancias les iban poniendo el cartel de “menos adaptadas”. Como ya hemos comentado, hoy en día hay muchos menos filos que los que se conocen a partir de los fósiles de la biota del Cámbrico. Menos pero también más singulares, en el sentido de que ahora prácticamente no se repiten fuera de un filo aspectos particulares de su fenotipo. Es como si la continua poda del árbol engendrado a principios del Cámbrico hubiera abierto tales huecos entre sus ramas que ya unas no se reconocen en las otras: gusanos, moluscos, artrópodos, braquiópodos, cordados... realmente son estructuralmente muy distintos.

El genetista John Maynard discurría al hilo de lo anterior que una vez establecido el escenario con tal riqueza de formas, no le quedó más alternativa que ir simplificándolas. En un medio con un catálogo de filos abarrotado, para que surgieran otros nuevos o bien tenían que aparecer a partir de mutaciones en los existentes, o bien tenían que surgir de nuevo, de la misma forma como lo habían hecho los ya existentes, es decir, a partir de células simples u organismos primitivos muy sencillos. En el primer caso, es decir, a través de mutaciones en los filos existentes, el salto de un filo a otro parece muy improbable dadas las diferencias tan grandes que hay entre los diseños de cada uno de ellos, de forma que la macromutación que hubiera llevado de uno a otro se hubiera hecho inviable. En la segunda hipótesis, la generación de nuevas estructuras desde escalones iniciales también parece improbable, ya que la competencia de los organismos más complejos, con una historia a sus espaldas y ya bien establecidos, anularían por selección natural a las nuevas aventuras. Así que a la biosfera animal sólo le quedó el camino del ajuste por regresión y disminución de variedad, como así ha sucedido.

La opinión de S. J. Gould se entrecruza con la de J. Maynard, a la vez que se apoya también en la ya comentada progresiva regresión de los grados de libertad de los genes. A medida que iban pasando los millones de años y la selección natural iba “cazando” a los que se despistaban, fueron quedando unos pocos cada vez más especialistas de sus nichos medioambientales, ya que en ello les iba la vida. Estos filos seleccionados, estos organismos con genes bien interrelacionados que les habían llevado al podio de la biota se encontraron con las manos atadas por su superespecialización, lo que les hacía muy difícil expresar grandes mutaciones. Así que el árbol fue proyectando sobre el horizonte unas ramas cada vez más potentes... y cada vez más escasas. Queda como la gran duda para Gould el determinar si las circunstancias que iban colocando a un determinado filo como último de su rama, al alcance de las tijeras podadoras de la selección natural, fueron en cada momento consecuencia de mil causas azarosas o bien resultado de un

camino inevitable y predestinado. De los veinticinco filos fósiles catalogados en Burgess Shale sólo cuatro perduran entre nosotros, filos éstos que sin lugar a dudas no tenían por qué ser necesariamente los mejor preparados, más que los otros veintiuno. Fueron los triunfadores porque las cartas les vinieron de cara.

La historia evolutiva del Cámbrico

Aquellos mares de hace más de 500 millones de años no eran muy distintos a los de ahora. Poblados por las mismas líneas familiares de animales de hoy en día, pero con otros cuerpos. Nos hace pensar que aquellos animales, hoy fosilizados, también provenían de otros antecesores de los que no sabemos mucho. Entre las antiguas bacterias y ellos se extiende un casi vacío del que sólo podemos especular con los datos de los que disponemos: ya sean morfológicos, extrapolando e imaginando parecidos entre los escasos fósiles y sus tataranietos que hoy en día viven, o bien de tipo genético, mediante análisis moleculares de proteínas o del ADN de sus parientes actuales –o de fósiles, aunque esta molécula se degrada con facilidad- buscando semejanzas de genes y hasta cuánto se parecen con sus descendientes actuales y entre ellos. El hecho de que los primitivos protistas tuvieran el cuerpo blando de difícil fosilización no ayuda a seguir las pistas. Pero vamos a intentarlo.

¿Cuál pudo ser el guión de esta película? Rebobinemos un poco el celuloide y vayamos de nuevo a los últimos momentos del Precámbrico. Como ya hemos comentado, el árbol filogenético se abrió exageradamente durante aquel periodo. Por los registros fósiles vemos que casi al comenzar el Cámbrico las esponjas continuaban con una fuerza vital extraordinaria, mientras que las medusas y pólipos ya se buscaban la vida. No serían muy distintos de sus parientes actuales.

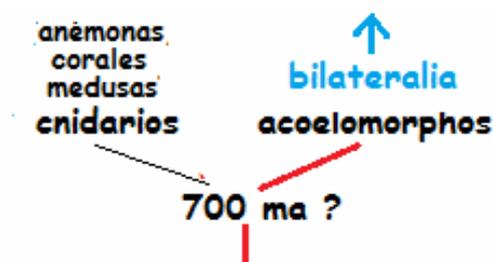
Hoy en día los dos últimos, medusas y pólipos, prácticamente comparten un mismo tipo de larva, llamada *plánula*, ciliada y nadadora, que tiene simetría bilateral. Puede optar por tener una vida libre flotando en el mar o bien anclarse en una roca del fondo. En la siguiente imagen podemos descubrir su anatomía no muy diferente a la de la imagen contigua, que sorprendente no es la de otra plánula sino la de un *Acelomorfo* actual. El paso ancestral de una a otra forma, de una larva de medusa a un animal bilateral, bien pudo ser debido a un proceso de “*pedomorfismo*“, palabra muy rara pero que sólo quiere decir que en algunos casos el inicio de la madurez joven/adulto se va retrasando, pero no así la madurez sexual que se mantiene en el tiempo, de forma que en algún momento los animales

reproductores maduros evolucionados llegan a fenotipos que mantienen la morfología juvenil de sus antepasados. Este pudo ser el mecanismo de enlace, unido también a un proceso de evolución convergente, entre los primitivos habitantes que sobrepasaron desde el Proterozoico la frontera del Cámbrico y los más básicos bilaterales sobre los que se gestó la fauna de la “explosión”, los antepasados de todos los animales actuales.



Plánula de vida libre (izquierda) (intrabiodev.obs) y Acelomorfo (derecha) (Fuente: Dr Bernhard Egger, UCL.)

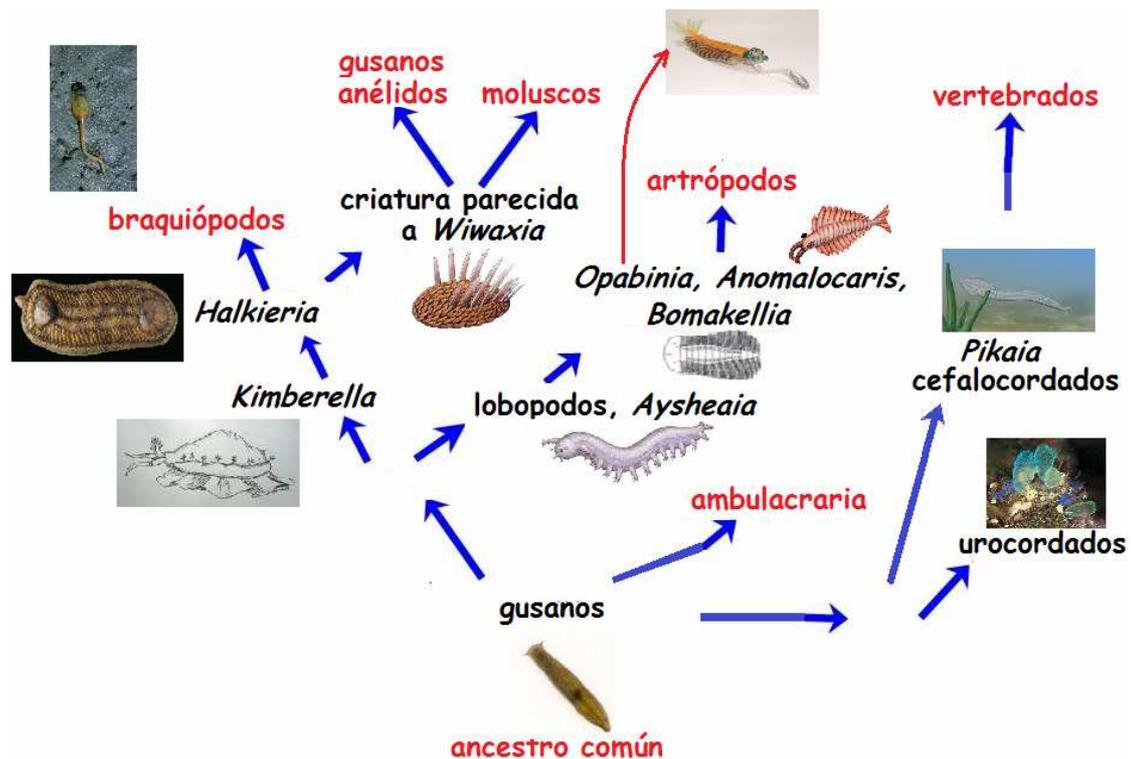
Al actual *Acelomorfo* se le consideraba hasta hace poco un diminuto gusano platelminto, un pequeño ser que se encuentra en la base de los animales bilaterales. Actualmente se le ha asignado un filo propio separado del de los platelmintos por lo que toma más énfasis la frase anterior. Eso quiere decir que un tatarabuelo suyo posiblemente fuera el ancestro común de todos los bilaterales, la mayoría de los animales de hoy en día, y el primero de ellos que constituyó filo propio. Si acudimos de nuevo al árbol filogenético de Dawkins presentado ya hace dos capítulos y hacemos un zoom sobre el momento del inicio de los animales bilaterales, nos encontramos con el siguiente esquema que nos permite asegurar la cercanía evolutiva de ambos filios:



Como podemos observar Richard Dawkins teoriza que el momento del inicio de la gran aventura, cuando se dio la separación entre cnidarios y acelomorfos, pudo haber sido hace ahora unos 700 millones de años. A

partir de aquel momento un ser parecido a la plánula, ciliado y plano, con simetría bilateral, estaba predestinado a ser el patriarca de todo el pueblo animal que le sucedió. Y se tuvo que esperar unos 110 millones de años de remodelación desde este animal y su descendencia para llegar a un diseño, aunque primitivo, más acorde con nuestros patrones habituales: lo imaginamos como un gusano con simetría bilateral, primo de los platelmintos, con un extremo que hacía de cabeza, en el que se abría el orificio de entrada al estómago. Tendría también unos ojos rudimentarios, apéndices bucales que usaba para alimentarse, un cuerpo que apuntaba ya hacia una segmentación, aunque realmente no era así, y algún tipo de ornamentación corporal. “*Dawkins dixit*”.

Este tipo de humilde espécimen nos recuerda a la contemporánea *Planaria* y sería el cabeza de serie, el ancestro común, de la fauna del Cámbrico. Vamos a ir ahora por barrios, guiados por el siguiente plano callejero con el que hoy en día se encuentran más confortables todos los informes de genética molecular.



Caminos evolutivos de los especímenes de la fauna del Cámbrico. La imagen del ancestro común corresponde a una Planaria actual. (a partir de imágenes de wikimedia)

Esto se pone interesante. La figura anterior es la hoja de ruta que vamos a seguir a lo largo de varios capítulos a partir de éste. En el próximo nos

atreveremos a analizar el inicio de todos los animales de semejante hoja de ruta. Nos esperan los artrópodos, braquiópodos, moluscos, anélidos y vertebrados... en definitiva, los principales filos de la biosfera.

19. Los filos del Cámbrico

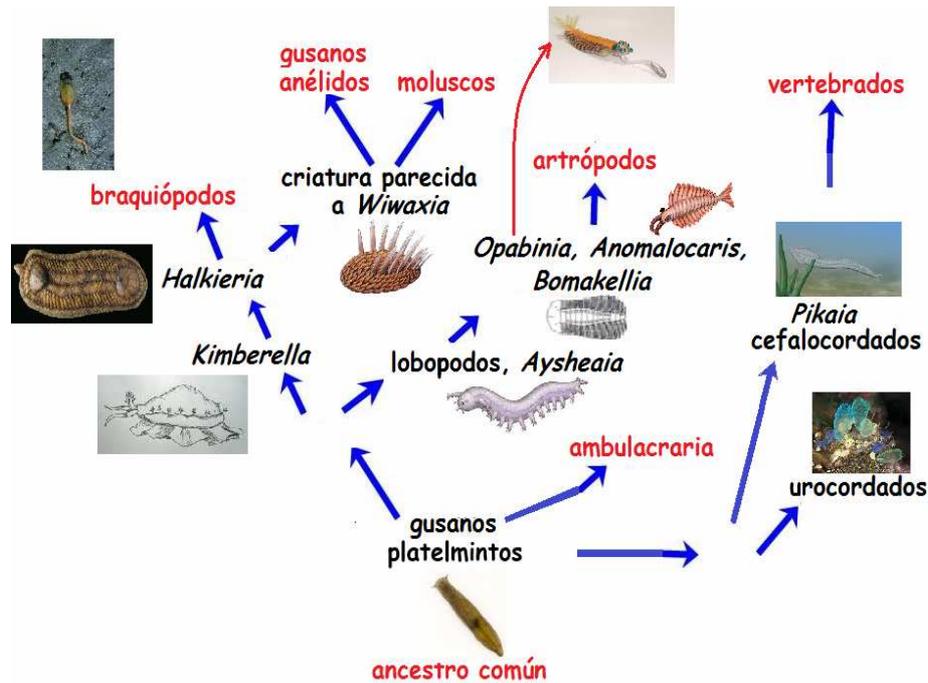
Tengo que advertir que desde este capítulo, y alguno que le siga, voy a abandonar el planteamiento cronológico de los hechos, siguiendo el paso del discurrir geológico tal como hasta ahora. La explicación es sencilla: aprovechando el impulso que nos ha dado en el capítulo anterior el esplendor de las radiaciones del Cámbrico, creo que viene como anillo al dedo abrir en este momento un serie de paréntesis en los que se vaya analizando paso a paso, independientemente de su duración temporal, cada uno de los diversos caminos que siguió la biota en pos de la rica complejidad de formas que surgieron en el entorno de este periodo.

Es obligado, por tanto, poner el foco sobre diferentes sucesos evolutivos de gran trascendencia de forma que podamos entenderlos y ver, por ejemplo, cómo pudieron aparecer la simetría bilateral, la notocorda, el aparato locomotor o el ojo, entre otros.

La claridad en el desarrollo argumental de cada uno de estos importantísimos aspectos de la evolución de la Vida exige a su vez una vida cronológica propia para cada uno de ellos. Así que nos moveremos desde el Precámbrico y a lo largo del Fanerozoico siguiendo el desarrollo evolutivo de cada uno de ellos, por lo que la sucesión de periodos se irá repitiendo al compás de cada nuevo monográfico.

En el capítulo anterior comentamos la expansión acelerada de nuevas formas de seres vivos en lo que se conoce como la explosión del Cámbrico. En aquellos momentos, hace unos 540 millones de años, se iniciaron los principales filos de animales que hoy podemos observar: artrópodos, braquiópodos, moluscos, anélidos o vertebrados. La evidencia fósil durante el Cámbrico es clara para todos ellos.

Continuamos ahora hablando de cómo pudieron iniciar la andadura cada uno de ellos, desde los albores en el Cámbrico hasta periodos posteriores. Y como elemento que ayude a seguir la saga, repetiremos aquí el árbol con el que cerrábamos el capítulo anterior. Debió ser algo así como una actual *Planaria* la que inició el árbol genealógico.



Caminos evolutivos de los especímenes de la fauna del Cámbrico. La imagen del ancestro común corresponde a una Planaria actual. (a partir de imágenes de wikimedia)

Un preludeo dedicado al gusano platelminto

En el esquema de la figura anterior vemos una raíz única, personalizada en un gusano platelminto. Por su posición de posible padre común de los principales filos de los metazoos actuales, bien se merece que le dediquemos una breve genealogía.

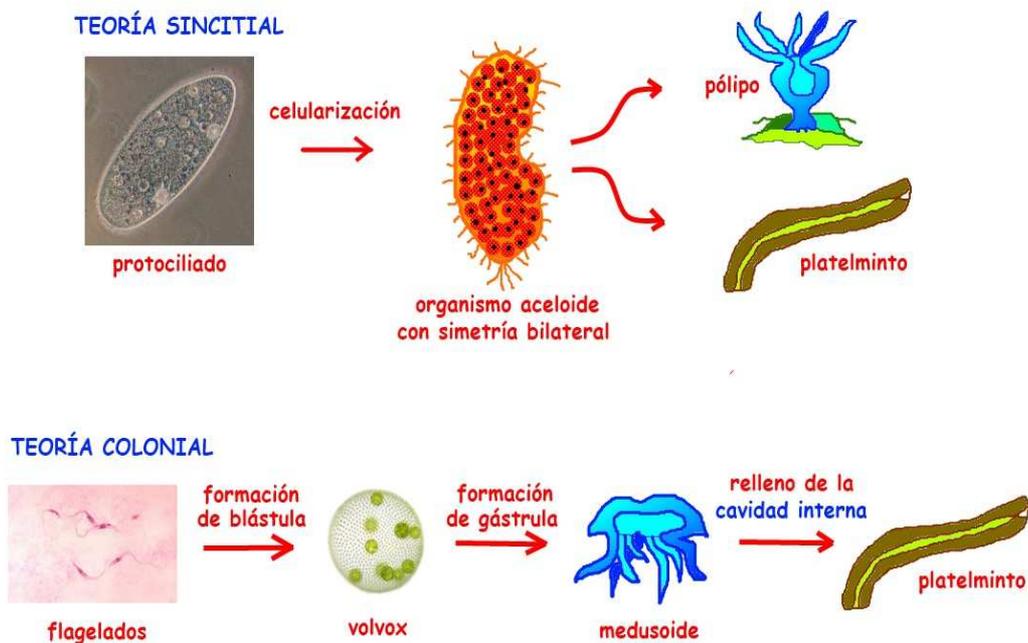
El biólogo Robert D. Barnes postulaba tres posibles vías por las que se llegó al primer organismo del Reino Animalia. Una de ellas parte de un animal ciliado, como el paramecio, que duplicó multitud de núcleos en su citoplasma y que con posterioridad los aisló mediante nuevas membranas. El resultado sería un organismo pluricelular. Dado que muchos de los ciliados actuales presentan simetría bilateral, bien pudo ser que el ancestral ciliado que pasó a multicelular adoptara esta simetría, transformándose en un platelminto (*teoría sincitial*).

La segunda teoría se apoya en los flagelados unicelulares. En una entrada posterior nos encontraremos con el caso del alga *Volvox*, y veremos cómo estos flagelados se agrupan formando unas esferas huecas. Con el tiempo estas esferas pudieron sufrir una invaginación conformando una línea de organismo de tipo medusa, para después rellenar su cavidad interna con

nuevas células de sus paredes, transformándose a la larga en un platelminto (*teoría colonial*).

Por fin, una *tercera hipótesis es más generalista*, ya que postula un paso evolutivo no especificado que transformó a algún ser unicelular en un platelminto.

Lo anterior nos lleva a lo que ya hablábamos en el capítulo anterior al analizar el árbol filogenético del Proterozoico, en donde comentábamos cómo las plánulas y los acelomorfos podían estar en la base de los animales bilaterales, y en consecuencia en la base de los platelmintos, los primeros de ellos.



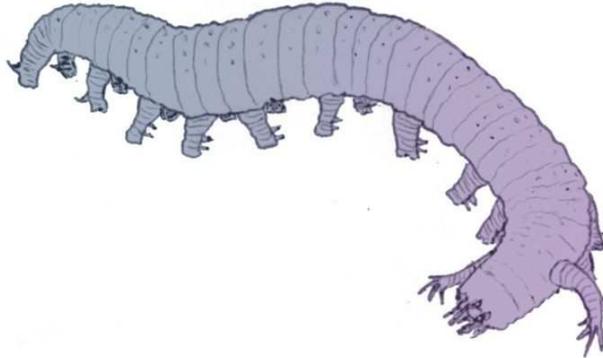
Evolución de los metazoos primitivos hacia el gusano platelminto, según las teorías de Robert D. Barnes

Sigamos ahora con el hilo principal atendiendo al filo de los artrópodos.

El camino de los artrópodos

Más allá de 536 millones de años atrás, un cuerpo cilíndrico con unos apéndices que se pueden clasificar como patas buscaba su vida protegido entre las colonias de esponjas. Unas patitas que básicamente eran una funda de músculos llenas de un líquido, que podríamos asemejar funcionalmente a la sangre, y que servían para moverse: los lobopodos. El primer fósil lobopodo se llama *Aysheaia pedunculata*, y tenía espinas en

sus patas que le servían para recolectar comida de los tapices bacterianos. A menudo disponían de numerosas placas blindadas que cubrían todo el cuerpo y la cabeza. Pero como eso les dificultaba la defensa, desarrollaron espinas. No se parecía a un artrópodo, pero iba camino de ello.



Reconstrucción de Aysheaia pedunculata (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

De los *Lobopodia* pasamos a *Diania cactiformis*. Se trata del primer ejemplar con patas articuladas típicas de los artrópodos. Es el primer Lobopodia con un exoesqueleto simple. La criatura que vivió hace unos 520 millones de años medía 6 centímetros de largo. El fósil no muestra signos de la existencia de ojos o mandíbulas, pero tiene 10 pares de patas articuladas. Se cree que estas patas tenían una superficie dura no muy diferente de las que hoy recubren los miembros de crustáceos o insectos. Se alimentaba del plancton y del detritus orgánico del fondo marino, y la armadura de sus patas probablemente se desarrolló como protección frente a los primeros depredadores.



Recreación de Diania cactiformis (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Y del *cactiformis* al trilobites y la familia artrópoda. Evidentemente el tránsito se hizo a través de varios escalones, pasando por la exoesqueletización del cuerpo y la aparición de los ojos. Del trilobites se hablará un poco más en la descripción del Ordovícico.



Fósil del trilobites Phacops rana (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Hace unos 515 millones de años ya se observan en los artrópodos unas morfologías semejantes a la de una gamba de hoy en día, es decir, bivalva en la parte dorsal y cuerpos segmentados acabados en un par de aletas. Algunos de sus fósiles nos han dado una gran información sobre la reproducción de estos animales. Se trataría de *Kunmingella douvillei* uno de cuyos especímenes, que procede del yacimiento chino de Maotianshan Shale, lleva en su interior huevos aún no fecundados. Un poco posterior es *Waptia fieldensis* especie de la que cinco de sus fósiles encontrados en Burges Shale, datados en 508 millones de años, portaban, éstos sí, huevos con embriones protegidos bajo su bivalva, lo que indica que esta estructura facilitaba su transporte, permitiendo el cuidado de las crías. Seguramente son las madres más antiguas de las que tenemos conocimiento.

Emparentado con los artrópodos vivió el extinguido *Anomalocaris*, la “gamba anómala”, el rey de la depredación del momento, hace de 525 a 510 millones de años. Siempre se ha creído que su visión debía aterrorizar. Podía medir hasta un metro de longitud y se movía con gran agilidad gracias a los numerosos lóbulos laterales y a los tres que conformaban su cola. El cuerpo articulado poseía un exoesqueleto orgánico. Aunque realmente lo que debía impresionar era la visión de su cabeza, con dos grandes apéndices llenos de espinas con los que atrapaba a sus presas y se

las llevaba a la boca donde los trituraba, ya que en ella disponía de un montón de láminas aserradas.

Los últimos estudios de sus fósiles realizados en 2009 por el paleontólogo del Museo de la Naturaleza y la Ciencia de Denver, James W. Hagadorn, parecen dar más luz a sus hábitos alimentarios, ya que determinan que la disposición de su boca no permitiría ejercer una fuerza suficiente como para romper caparazones duros como el de los trilobites, y que quizás tuvieran una forma de alimentarse más generalista con un amplio abanico de hábitos alimentarios, desde depredador acechando a la emboscada hasta realizar una criba de sedimentos en busca de carroña o diminutos restos orgánicos.

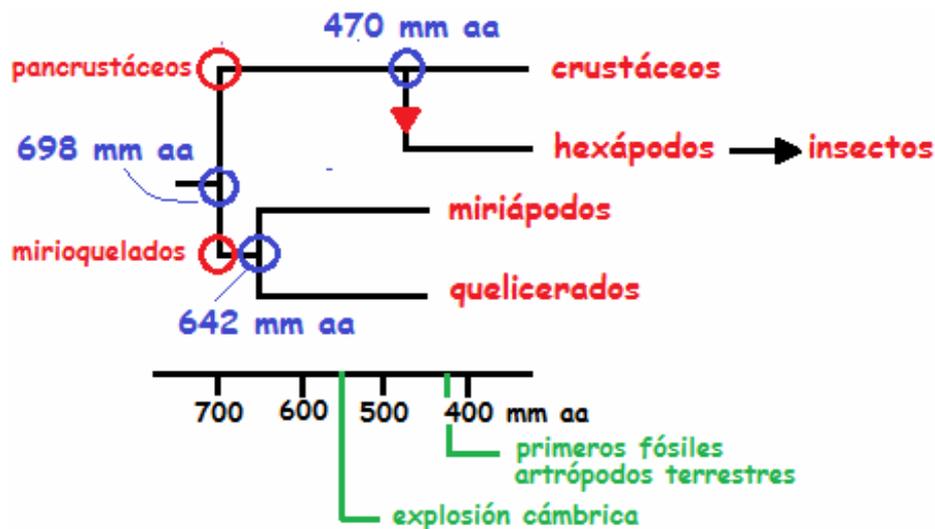
El *Anomalocaris* lo tendría todo controlado mediante un par de ojos compuestos, tipo yunque, que le daban una visión clara de la que se aprovechaba para cazar con precisión en las bien iluminadas aguas de los mares cámbricos. Para procesar esa información tenía que haber desarrollado ya un cerebro en consonancia. Esta hipótesis no resulta sorprendente, puesto que hay pruebas moleculares que indican que las estructuras clave del cerebro humano datan de hace más de 600 millones de años.



Imagen artística de Anomalocaris saron depredando trilobites (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

No obstante, no todas las especies de este artrópodo eran tan terroríficas. Recientemente (2014) se ha comunicado el descubrimiento⁽³²⁾ en un yacimiento de Groenlandia de un “especial” anomalocárido de hace 520 millones de años, *Tamisiocaris borealis*. Sus apéndices frontales habían desarrollado la forma de una red, con la que efectuaba algo así como una pesca de arrastre, atrapando por filtración plancton de hasta medio milímetro de tamaño. Se cree que esta especie adoptó esta solución para su alimentación en respuesta a la competencia que suponía el entorno de gran presión depredatoria del Cámbrico, lo que les obligó a cambiar de nicho ecológico.

Habrá que esperar hasta la frontera del Silúrico con el Devónico, unos cien millones de años después (416 millones de años), para que los artrópodos dejaran el agua y conquistaran la tierra, abriendo el nuevo mundo de los insectos, arañas, escorpiones y miriápodos.



Aparición y diversificación de los artrópodos (de acuerdo a los estudios de Davide Pisani, 2009)

El esquema anterior indica la correlación filogenética entre los diversos subfilos de los artrópodos, en donde se muestran los momentos de las divergencias entre ellos. Está basada en estudios⁽³³⁾ realizados en 2009 por el biólogo Davide Pisani sobre las secuencias de genes nucleares y mitocondriales de estos animales. Los resultados son discrepantes en cuanto al punto de partida temporal de este filo con los que dimos al hablar del Proterozoico, cuando presentábamos la cronología filogenética basada en la información del libro “*The ancestor’s tale*” (2004) de Richard Dawkins, en donde el punto de divergencia de los artrópodos se situaba unos cien millones de años más tarde.

El esquema de Pisani amplía la información, pudiéndose observar el parentesco tan próximo entre crustáceos e insectos, que quedan enlazados por un hexápodo ancestral que apareció por evolución de un crustáceo en un ambiente de agua dulce cuando aún no se había conquistado el medio terrestre.

El camino de los braquiópodos

Por la misma época en que los artrópodos comenzaban su carrera de éxito, hace unos 555 millones de años habitaba el fondo marino un extraño animal ovalado, bilateral, que al igual que una babosa se encogía y alargaba para moverse en una dirección: el *Kimberella*. Sus restos fósiles se han encontrado en el yacimiento australiano de Ediacara y con posterioridad en la región rusa del Mar Blanco. Estaba recubierto por un tegumento no mineral, firme pero flexible, que no le impedía el movimiento, formado por una especie de pequeñas escamas que se hacían más duras a medida que el animal crecía, y le rodeaba una especie de volante que haría las funciones de agallas rudimentarias.



Representación artística de Kimberella (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Más tarde, hace unos 525 millones de años, el *Kimberella* convivía en el mar con otros seres, quizás uno de ellos el *Halkieria*, un animal con cuerpo plano y simetría bilateral, con un “vientre” liso y pegajoso como el de una babosa. Se movía por el fondo marino mediante este vientre mucilaginoso. Su parte dorsal estaba protegida por escamas huecas ancladas a la espalda mediante un tallo, formando una especie de armadura.

Y lo más curioso es que sobre la espalda, en sus dos extremos, acarrea dos conchas parecidas a valvas, la posterior muy semejante a la de los braquiópodos del Cámbrico. Una posible explicación de por qué desarrolló esta extraña morfología es que le era sumamente útil cuando se veía atacado: se plegaba por la mitad, más o menos protegido dentro de las dos

placas. Como la predación en su época era la norma, quizás la evolución le llevó a adoptar definitivamente esta forma, doblada, anclándose en un lugar. Se trata de la *Halkieria evangelista*.



Fósil de Halkieria evangelista. Se aprecian claramente las dos valvas que protegían ambos extremos de su cuerpo (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Después de contemplar a *Halkieria* es casi inevitable el sospechar el siguiente paso ¿No parece creíble que la cadena evolutiva “gusano Platelmino-Kimberella-Halkieria” nos deba llevar hasta los Brachiopoda? A la vista de la imagen siguiente no es difícil imaginar a un braquiópodo como un *Halkieria* doblado en posición defensiva.

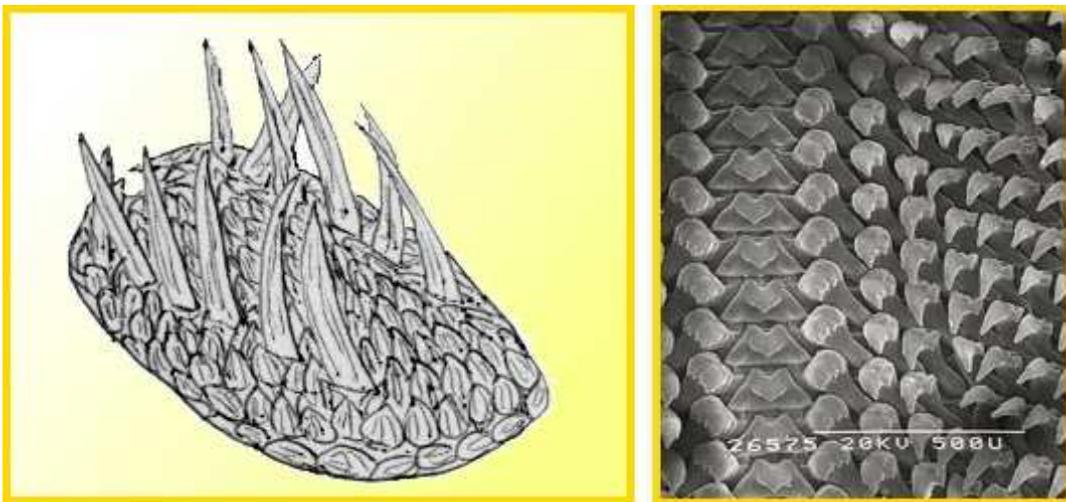


Fósil del braquiópodo Leptaena acuticuspidata (Fuente: Consejería Educación Junta de Andalucía)

Los braquiópodos se diferencian de los moluscos bivalvos en que sus dos conchas presentan una disposición de superior/inferior, unidas en la región posterior, mientras que en los moluscos son bilaterales (derecha/izquierda).

El camino de los moluscos

Ya hemos hablado del *Kimberella* como posible ancestro de los braquiópodos. Pero también lo fue de los moluscos, según los estudios genético-moleculares. Junto a sus fósiles se encuentran marcas muy similares a las que hacen los moluscos cuando raspan con sus rádulas, su característico aparato alimentador. Aunque en algún caso, como el de los especímenes encontrados en los yacimientos rusos del Mar Blanco, ninguno presentaba signos de poseer rádula.



*Representación artística del Viwaxia y rádula de un molusco actual
(Wikimedia, GNU FDL 1.2)*

También la mencionada *Halkieria*, ornamentada con una valva en cabeza y otra en cola, está en el camino de los moluscos a través de *Viwaxia*. Ambos tienen puntos en común, una base blanda tipo babosa mediante la que se desplaza, y escamas huecas con una misma estructura microscópica y ordenadas también en tres zonas. Pero *Viwaxia* había dado un paso más. Es el animal más antiguo que conocemos con rádula.

Más allá de estos animales se encuentra lo que pudiera ser el primer molusco, el aplacóforo. Literalmente significa “*que no lleva concha*”. Tiene apariencia de gusano recubierto de espinas calcáreas. Se supone que por fusión de estas espinas se llegó a la concha de los verdaderos moluscos. Bien pudiera ser que las escamas de *Viwaxia* pudieran sufrir un proceso semejante.



El aplacóforo Epimenia verrucosa (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

El *Nectocaris pteryx*, un animal fósil de hace 500 millones de años, era un antepasado carnívoro de los calamares y por tanto el antecesor más antiguo que se conoce de los moluscos cefalópodos. Un reciente estudio revela que *Nectocaris* era similar a los miembros del conocido grupo moderno de los cefalópodos -que incluye pulpos, calamares, sepias y nautilus, así como los ya desaparecidos ammonites y belemnites perdidos en pasadas extinciones masivas-.



Fósil (Wikimedia, dominio público) y representación artística de Nectocaris pteryx (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Los especímenes fósiles, de entre dos y cinco centímetros de largos, muestran que *Nectocaris* tenía forma de cometa y se aplanaba desde la cabeza a la cola. Tenía un par de ojos pedunculados y un par de tentáculos largos para atrapar las presas que consumía. Se cree que esta criatura utilizaba sus aletas laterales para nadar y, como los modernos cefalópodos, también usaba una tobera en forma de embudo para acelerarse mediante propulsión a chorro.

El camino de los anélidos

Aquí tenemos que seguir acudiendo a *Viwaxia*. Los poliquetos actuales son gusanos anélidos con una apariencia peluda o espinosa. Los pelos se llaman *quetas* y están mineralizados: la microestructura de estas quetas es idéntica a la de las escamas de *Viwaxia*. Y todavía hay más conexiones: *Canadian*, un gusano anélido de los poliquetos, cuenta con una concha quitinosa en uno de sus extremos. Sorprendentemente, un espécimen de *Viwaxia* presenta también en un extremo una especie de concha que le emparenta con su antecesor *Halkieria*. Y no sólo la relación se da en la morfología de las conchas de poliquetos con las de *Viwaxia* y *Halkieria*, sino que los análisis moleculares así parecen avalarlo.



El poliqueto actual Nereis succinea (Wikimedia CC BY-SA 3.0)

El camino de los vertebrados

La historia de los vertebrados empieza con el invento de los cordados durante el Cámbrico. La corda, estructura que les da nombre, es una varilla que se extiende a lo largo del cuerpo y que tiene una rigidez suficiente

como para proporcionarles un sostén. Se sitúa en posición dorsal con respecto al tubo digestivo.

Un grupo de investigadores del instituto médico norteamericano Howard Hughes afirma en un reciente estudio⁽³⁴⁾ (2014) que la notocorda evolutivamente procedería de estructuras musculares que habrían desarrollado animales aguas arriba del árbol filogenético cordado. Posteriormente este “fleje” muscular denominado axocorda desarrollaría un bastón central cartilaginoso, elemento que daría mayor eficiencia a la natación (tal como se observa en el moderno anfibio).

Según Richard Dawkins, éste fue el árbol filogenético familiar.



Árbol filogenético según Richard Dawkins

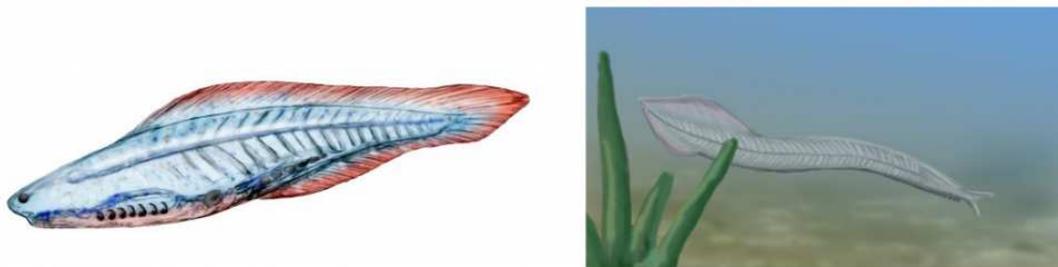
Comienza la saga con unos fósiles encontrados en el yacimiento de Maotianshan Shales, en China, datado en el bajo Cámbrico de hace 525 millones de años. En él se han encontrado, entre otros, restos de animales que parecían iniciar la línea de los peces: el *Haikouella*, un “gusano” cartilaginoso que poseía ojos, intermedio entre los invertebrados. Se trata aún de un primitivo cordado.

El *Haikouella* tenía notocorda, hendiduras branquiales por las que absorbía agua y cribaba los alimentos y arcos branquiales, que son pequeñas barras cartilaginosas entre las hendiduras branquiales. Son particularmente importantes estas características ya que representan la primera evidencia de un armazón, aunque cartilaginoso, que sustentaba longitudinalmente al cuerpo y que con el tiempo derivaría hasta la columna vertebral de los vertebrados. Evidencia una estructura de hendiduras y soportes gelatinosos cuyo diseño es semejante al que presentan los peces y al que tienen los embriones de los tetrápodos durante su desarrollo inicial. Con

posterioridad veremos que estas estructuras son las que conformaron los huesos, nervios y músculos de la cara y cuello de los mamíferos. Sin duda el *Haikouella* es el ancestro más remoto con un plan corporal precursor, y además ya similar al nuestro.

También en los yacimientos chinos de Maotianshan Shales se ha encontrado el *Haikouitchys* (el mismo nombre le delata, “pez de Haikou”). Parecido a *Haikouella* aunque ya había iniciado el camino de la especialización encontrándose clasificado en el subfilo craniata, los craneados. Contaba por tanto con una estructura craneal, quizás el más antiguo cráneo descubierto hoy en día.

Una noticia⁽³⁵⁾ aparecida en junio de 2014 nos permite expandir el campo geográfico de este tipo de animales antecesores de los vertebrados. Debían ser muy ubicuos en los mares del Cámbrico. En el otro extremo del mundo, en el yacimiento de Burgess Shale de Canadá, se encontró lo que bien pudiera ser un nuevo “nieto” del cordado *Haikouella*. Se trata de fósiles de *Metaspriggina*, datados en hace 505 millones de años, del que se ha comprobado la proximidad filogenética con *Haikouitchys*. Se ha podido determinar su especial disposición de los arcos braquiales, dobles, que permite hacer un seguimiento en el tiempo de la evolución de las mandíbulas. En una entrada posterior analizaremos la relación entre ambas estructuras corporales.



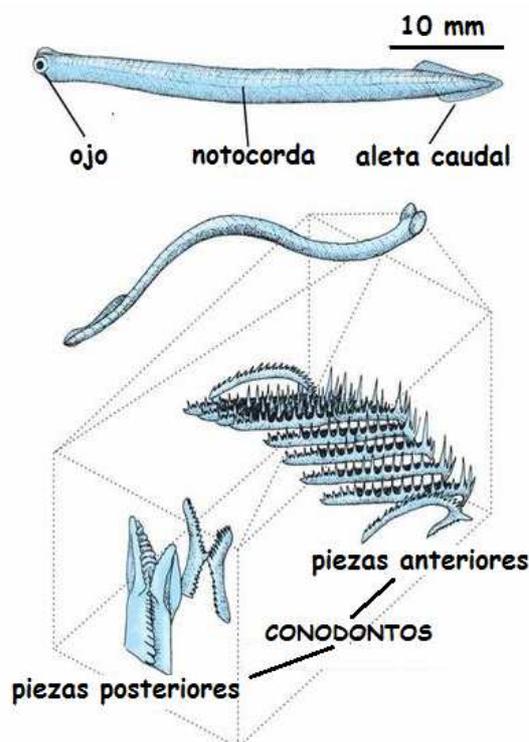
Representación artística de Haikouitchys, izquierda, (Wikimedia CC BY-SA 3.0) y de Pikaia gracilens, derecha, (Wikimedia GNU FDL 1.2)

También del yacimiento de Burgess Shale es el fósil de *Pikaia*, datado también en hace unos 505 millones de años. Inicialmente se le consideró como uno de los ancestros más antiguos de los vertebrados. Esta afirmación presenta muchas dudas para los círculos científicos y parece que filogenéticamente se debe encontrar más próximo a la línea de los cefalocordados (ver figura anterior). Disponía de un rudimentario cordón “columna vertebral”, formado por cartílago junto a su médula espinal, que no habían desarrollado un engrosamiento de la corda en el cráneo a manera

de encéfalo. De ahí el nombre del subfilo. En promedio medía 5 centímetros de longitud y debía nadar con facilidad sobre el fondo marino mediante movimientos ondulatorios, usando su cuerpo y una prolongación de su cola como timón.

Siempre se ha dudado sobre cuál pudo ser el siguiente paso hacia los modernos vertebrados ¿el rudimentario esqueleto óseo ancestral provendría de una variación de las estructuras dentarias o bien de protecciones externas resultantes de un endurecimiento de la piel?

La primera vía la representa el *Conodonto*, un cordado parecido a una anguila. No tenía mandíbulas y se piensa que se alimentaba a través de una boca succionadora muy parecida a la de las actuales lampreas. En esta boca se encontraban unas estructuras óseas semejantes a dientes. Una especie de lengua los sacaba e introducía de la boca, movimiento mediante el que posiblemente raspaba y cribaba las rocas cubiertas de algas. Incluso les servirían para atrapar a otro tipo de presas, por lo que con el tiempo estos animales se convirtieron en feroces depredadores. Estos dientes eran de fosfato de calcio y es lo que permite pensar que pudieran ser los más primitivos indicios del hueso. Aparecen hace 500 millones de años y se siguen encontrando hasta el Triásico, hace unos 200 millones de años



Representación del Conodonto y sus placas
(agnatosactuales.wikispaces.com, CC BY-SA 3.0)

La segunda vía de radiación de los vertebrados es la representada por los animales con coraza protectora externa y aparece con los Ostracodermos. Ellos fueron los primeros peces y aún no habían desarrollado las mandíbulas. Sus fósiles están datados en hace 475 millones de años durante el Ordovícico. En la entrada correspondiente hablaremos más de ellos al continuar la saga de los vertebrados.

Una vez presentados los actores nos seguimos preguntando ¿la línea filogenética de los vertebrados se dispone a través de la serie Pikaia/Conodonto/Ostracodermo o bien tras Pikaia se abren en paralelo por un lado la línea de Conodonto y por otro la de Ostracodermo/resto de vertebrados?

Las últimas investigaciones⁽³⁶⁾ parecen demostrar que el último planteamiento es el correcto, de forma que en la historia evolutiva se habría dado por duplicado el episodio de generación de estructuras óseas, una en los conocodontos y otra en los primeros peces acorazados que es la que habría llegado hasta nuestros días.

Adquiriendo habilidades

Este esplendor de vida del Cámbrico se materializó en cincuenta nuevos grupos animales que en apariencia no tenían antecesores conocidos. La mayoría, con simetría bilateral que continúa hasta hoy en día, demostrando que es una habilidad ganadora.

Partíamos de una fauna del Precámbrico tardío que no había desaparecido completamente como lo había hecho la ediacara, ya que su acervo genético les dio alguna ventaja que les favoreció, seres microscópicos que habrían dado el salto ayudados por nuevas habilidades que se habían conseguido, ya desde el Precámbrico, a través de pequeños pasos. Está claro que con cada cambio se abría para el organismo que lo había desarrollado un horizonte de nuevas posibilidades, llevándolos a formas distintas y más complejas, que no necesariamente más perfectas. Simplemente una alternativa más que podía sobrevivir... o no.

Ya se ha comentado que uno de los detonantes que favorecieron la rápida diversificación bien pudo ser el cambio de estrategia a la hora de buscar alimento, actividad que se independizó del azar (comer cuando la comida se cruzaba en tu camino), para ir activamente en su busca en vez de permanecer a la espera, lo que pudo estimular una carrera armamentística entre predadores y predados. En esta carrera las nuevas habilidades eran permitidas por la selección natural. Un elemental sentido de la visión

suponía una ventaja a la hora de buscar comida o cobijo, lo que diferenciaba positivamente a quien lo tuviera del vecino que no lo hubiera desarrollado. Una cuerda cartilaginosa permitía el soporte del cuerpo y reforzaba la capacidad de movimiento. Y más útiles complejidades: ¿Por qué la simetría bilateral? ¿cómo aparece el cráneo? ¿y el éxito de los ojos? ¿el porqué de las mandíbulas? ¿cómo se desarrollaron las “patas”? ¿por qué llegó la especializada segmentación corporal? ¿cómo apareció el sistema nervioso que controlaba toda esta complejidad?

Los siguientes capítulos serán un escaparate en donde analizaremos cómo fueron los detalles que contestan a estas preguntas. La clave la tiene la mutación en el genoma particular de cada animal, cualquiera que fuese la vía que se siga, y la posterior selección natural. Aunque tendremos que esperar un poco, ya que antes nos toca hablar de esta última, la selección natural.

20. La evolución por selección natural

En el capítulo anterior hablábamos de los caminos iniciales que habían seguido los animales de los principales filos aparecidos durante el Cámbrico. Todos siguieron sus propios vericuetos de acuerdo al campo de juego permitido por la selección natural. Ahora nos toca hablar de esta última.

Aunque es evidente, hago una advertencia parecida a la que comenté en la entrada anterior. Con el monográfico de este capítulo rompo de nuevo el devenir cronológico de la biografía de la Vida, que recuperaré una vez acabemos con una especie de “miniserie” interna, que ocupará varias entradas, sobre diversos aspectos de la evolución que creo merecen una atención especial.

La selección natural ha estado presente en todos los momentos, tanto en el mundo prebiótico como desde cuando la Vida apareció sobre la Tierra. El medio pastorea al individuo, que necesariamente se amolda a ello. El que mejor preparado esté será el que pase adelante. Pero aunque es algo que ocurrió siempre, es en el Cámbrico donde parece que el juego comenzó a ser por primera vez más intenso y sus evidencias más abrumadoras. Tuvieron que pasar unos tres mil millones de años desde las bacterias fotosintetizadoras hasta la fauna ediacara. Por el contrario bastaron sólo 70 millones de años más para que la biosfera volviera a ser irreconocible. Todo fue la consecuencia de un tira y afloja motorizado por la selección natural que respondía al empuje de la presión ambiental, no sólo geológico o climático, sino también el ejercido por la propia biosfera circundante.

Empezaremos por la definición de evolución.

En el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española se dan hasta nueve acepciones para la palabra evolución. Entre ellas, la que corresponde al fondo de este capítulo:

“Proceso continuo de transformación de las especies a través de cambios producidos en sucesivas generaciones”.

Queda claro. No aparece ningún atisbo que permita pensar que en el concepto de evolución se encuentra implícito el de mejora, aunque para la mentalidad competitiva humana parece que la evolución sólo tiene sentido si es para mejorar. Sin embargo, evolucionar no es equivalente a mejorar, sino simplemente a desarrollar, transformarse, cambiar.

¿Qué es la evolución biológica?

Es el pausado caminar de la Vida por el que, partiendo de ingredientes muy elementales, tras un proceso generalmente lento y progresivo, se van derivando formas más complejas.

En cada particular momento de la historia de la Vida encontraremos latiendo a una activa biosfera cuajada de organismos interactuando con el medio, que es toda la bullente variedad que les rodea incluidos ellos mismos, con el fin de alimentarse y pasar su herencia al futuro. En este proceso no hay ningún acto volitivo y todo funciona de forma precisa y automática.

En cada momento observamos que se producen cambios y mutaciones en el acervo biológico de las especies. Estos cambios y mutaciones son provocados por muy diversas causas. En los corrillos de la Ciencia hay algunas aceptadas con gran consenso generalizado y otras consideradas meras especulaciones.

El acervo genético se transmite de generación en generación. Si hay mutaciones y cambios, estos serán también heredados por los descendientes de los padres que hayan sufrido la transformación. La consecuencia de todo ello es que la segunda generación será distinta de la anterior y deberá enfrentarse de forma distinta a su medio ambiente, que seguramente también habrá variado entre una generación y otra. Normalmente el cambio será tan nimio que resultará difícil diferenciar al hijo del padre.

El medio ambiente, como en el juego del Tetris, propone un espacio a cualquier elemento que entra en la escena, pero sólo le hace ganador si encaja. Así, los nuevos cambios y mutaciones son testados por él, dándoles continuidad si los considera favorables o neutros, o poniéndoles un magnífico stop en el caso que sean desfavorables.

Y así aparece una nueva generación en el siguiente momento temporal sobre la Tierra.



Esquema general de la evolución de las especies

Estas ideas se comenzaron a fundamentar ya en el siglo XIX, ya que en 1809 el naturalista francés Jean-Baptiste Lamarck propuso por primera vez, en su libro “*Filosofía zoológica*”, que los organismos vivos no habían sido creados, sino que eran consecuencia de un proceso evolutivo a partir de formas más simples. A esta teoría se la conoce como Lamarckismo. El mecanismo que hacía funcionar su teoría lo llamo “herencia de los caracteres adquiridos”, por el que establecía que las habilidades adquiridas por los padres en su esfuerzo por la supervivencia se transmitían a los hijos. Es famosa la propuesta de que el esfuerzo que las jirafas hacen por comer las hojas cada vez a mayor altura, en competencia con sus congéneres, les hacía crecer el cuello. Una mayor longitud que era heredada por su descendencia

Cincuenta años después sería superado por lo que hasta hoy sigue siendo el paradigma: la Teoría de la Selección Natural de Darwin. A comienzos del siglo XX cuando ya se conocían las reglas básicas de la genética (genes, ADN, transmisión sexuada de los genes, la herencia implícita en ellos...), se afianzaron las ideas de Darwin. Con posterioridad, y con el desarrollo del conocimiento de la genética, de la biología molecular y la aparición de nuevas tecnologías que permitieron unos estudios más profundos y detallados, surgieron nuevas voces, discordantes o alternativas, pero siempre enriquecedoras.

Charles Darwin dio una explicación de como funcionaba la evolución. Apostó por que los organismos vivos sufrían una serie de cambios fenotípicos que serían seleccionados o excluidos por el medio ambiente según el grado de adaptación al mismo. Quien pasara adelante podría engendrar descendencia, la cual heredaría sus innovaciones genéticas colocándose en una situación exitosa como la de sus padres. El proceso

sería azaroso, sin propósito determinado, y se produciría a un ritmo lento pero continuo.

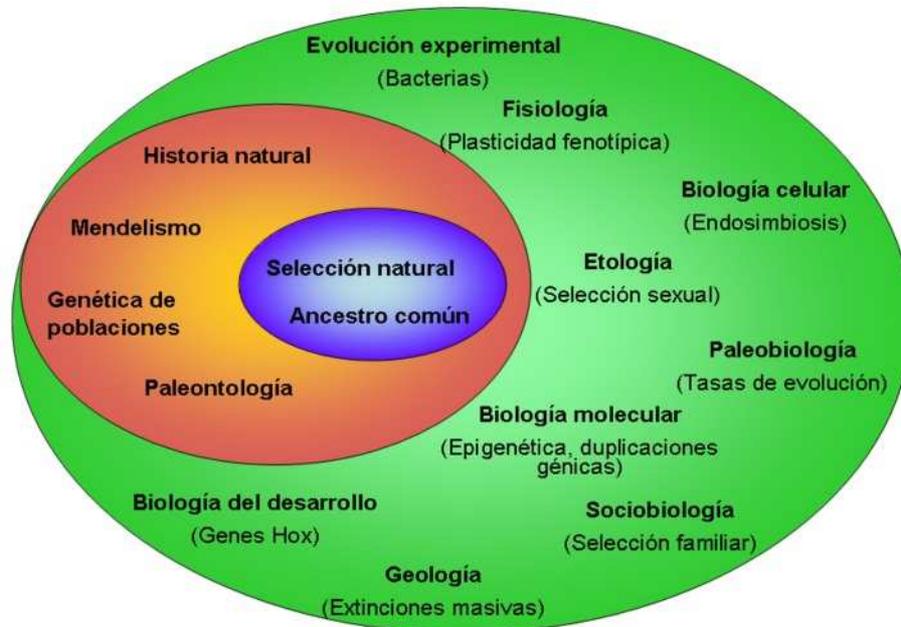


*Los pioneros del evolucionismo, Mendel, Lamarck y Darwin
(Wikimedia, dominio público)*

A partir del desarrollo de la genética a principios del siglo XX se redescubrieron las leyes de Mendel, que ya eran conocidas, aunque habían quedado aparcadas en un armario durante la época de Darwin. Con ello se tuvo una explicación científica del porqué de las modificaciones que Mendel postuló en su teoría. La genética hizo más sólido el argumento al descubrirse los genes y sus mutaciones. La unión de todas estas ideas científicas dio lugar a lo que se llama la teoría sintética de la evolución. Con ella se ha pasado de la idea de que en un mundo con escasez de recursos el ser más adaptado es el que sobrevive, a la idea de que el que progresa es aquel que está mejor preparado para reproducirse, lo hace con más intensidad y además sus herederos poseen la misma habilidad.

Sin embargo, la propia teoría dejaba en el aire la posibilidad de diversas interpretaciones acerca de tres aspectos fundamentales, como eran cuál podía ser el motor, cuál el ritmo y cuál la dirección de la evolución. O incluso cuál pudiera ser el ente básico que evoluciona: genes, individuos, grupos, especies,... El proceso podía ser lento o rápido, el proceso podía ser azaroso o con un propósito, el motor de la evolución podía ser el medio ambiente o se encontraba implícito en el propio organismo que evolucionaba, los genes mutaban puntualmente o había transferencias genéticas en grandes bloques, el cambio era unidireccional o podía dar marcha atrás... en fin, un campo propicio para la discusión científica. Y aquí entró de lleno la especial idiosincrasia de los humanos y su ego. Aún dentro de un contexto en donde nadie discute la veracidad del proceso evolutivo, cada maestro, cada científico, manuscibe sus particulares

opiniones, a veces con gran vehemencia. Y así, a lo largo de la historia podemos encontrar en los libros de la teoría de la evolución “dictámenes” para todos los gustos de grandes investigadores, biólogos, genetistas y paleontólogos, en los que se entremezclan diferentes visiones de las incógnitas que dejó abiertas la teoría básica de Darwin, fabricando entre todos ellos un exhaustivo abanico de combinaciones.



Representación gráfica de la continua expansión de la teoría evolutiva en términos de las ideas, fenómenos estudiados y campos del conocimiento. La elipse más pequeña representa el Darwinismo original, la elipse de tamaño intermedio a la Teoría Sintética y la más grande, a la síntesis ampliada. Esta última integra a por lo menos diez disciplinas científicas adicionales (Wikimedia, dominio público)

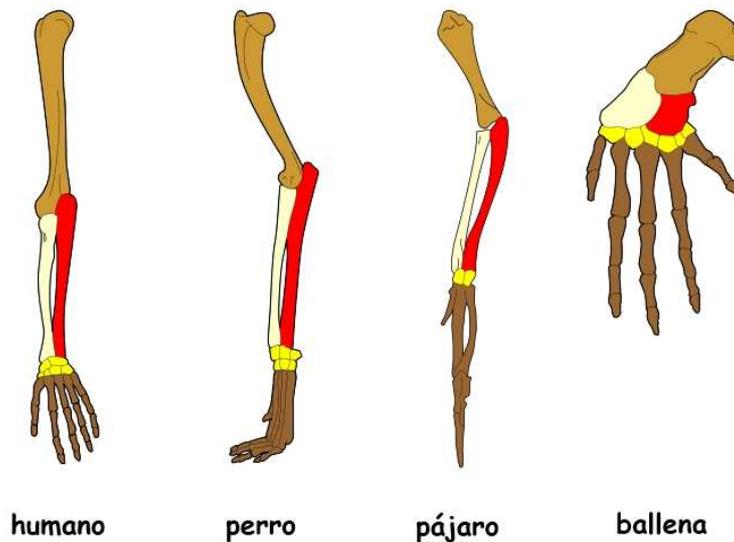
Soy de la opinión de que prácticamente todas las aportaciones son complementarias y que todas ellas pueden dar una explicación parcial de un proceso general que se esquematizó en la figura anterior. Todas mejoran el conocimiento de lo que parece que pudo ser. Algo así puede deducirse de la figura siguiente, que representa la expansión de las ideas evolucionistas.

La realidad de la evolución

Hemos comentado que nadie en el mundo de la ciencia cuestiona la realidad de la evolución, ya que hay fuertes evidencias de ello soportadas en múltiples hechos comprobados.

Podríamos empezar por una certeza: la de que no hay ningún dato, hallazgo o evidencia que muestre que todas las especies aparecieron a la vez.

Y luego seguir por la clara pista que dejan los fósiles. De su observación se concluye una línea de progresión evolutiva que no se contradice con la línea de progresión geológica-temporal de los estratos donde fosilizaron. En estratos más antiguos encontramos siempre organismos representantes de etapas evolutivas menos desarrolladas.



Homología de varios huesos (mostrados en distintos colores) de las extremidades delanteras de cuatro vertebrados que permite imaginar un ancestro común para todos ellos (Wikimedia, dominio público)

Así, hasta concluir con el hecho de que el análisis taxonómico de grupos de fósiles evidencia en sus estructuras y tejidos una progresión en el tiempo constante y gradual, apareciendo en diversas especies soluciones, características y funciones comunes que permiten pensar que lo más plausible es que se originaran en un ancestro común. Por ejemplo, como vemos en la imagen anterior, los mismos huesos con distintas formas y tamaños en individuos de especies distintas.

Con el avance en el conocimiento de la genética y la biología molecular se ha podido hacer un rastreo de genes y proteínas y sus mutaciones, así como de las secuencias de nucleótidos en los ADN y los porcentajes que comparten las especies, llegando siempre a la conclusión de una evolución constante a partir de unos antecesores comunes y más simples. Todos los seres vivos compartimos demasiado genoma, multitud de soluciones

metabólicas y reiteración de los mismos diseños corporales, con una más que plausible explicación en la evolución.

Esta evolución se ha producido por lo general de forma continua y lenta, por acumulación de pequeños cambios entre padres e hijos. Lo cual tampoco hay que considerarlo como una regla general, ya que en la crónica también se sabe de episodios en donde la velocidad del cambio se aceleró, surgiendo nuevas especies de forma muy rápida a nivel de percepción temporal geológica. El estudio de los datos reales nos ha permitido saber que el camino de la evolución ha sido progresivo, a veces al paso y a veces al galope, pero que no se ha parado en el tiempo. Al analizar los motivos de los cambios en el acervo genético de la biomasa veremos que ambas modalidades encajan perfectamente, ya que algunos cambios son claramente lentos y progresivos y otros aparecen tras lo que parece un salto.

El motor de la evolución

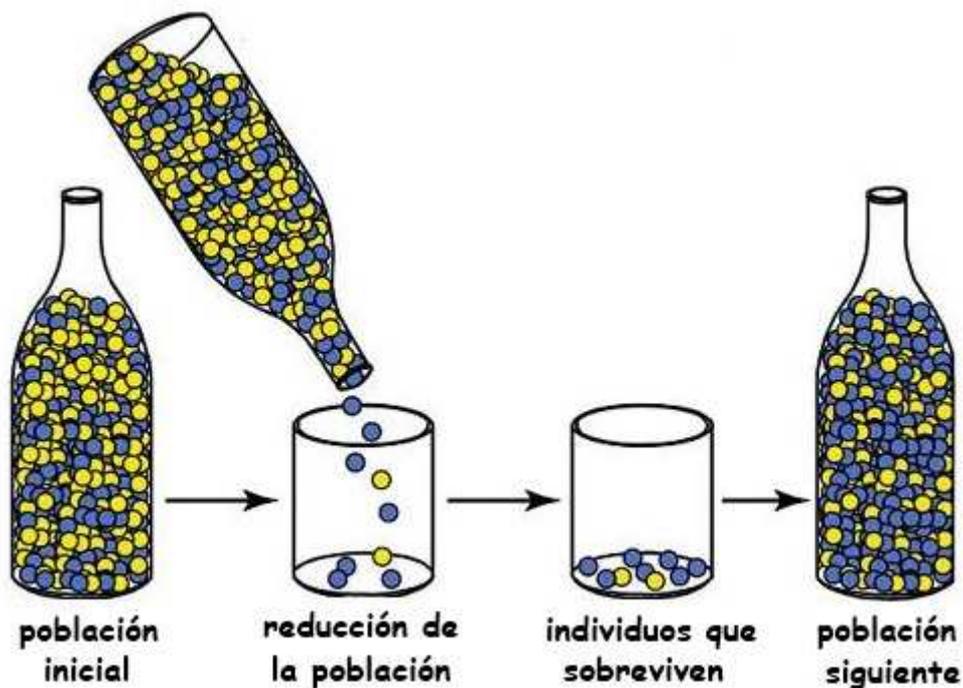
Antes hablaremos del motor de la evolución, aquello que impulsa el camino de los cambios. Después de todo lo comentado, no hay que insistir en que la gran mayoría del mundo de la biología acepta como la gran impulsora de la evolución, y casi única, a la selección natural. Es la principal causa del origen de las especies y de su adaptación al medio, que actúa respetando aquellos cambios que permiten a los individuos que los ostentan el sobrevivir durante un periodo lo suficiente extenso como para reproducirse y así transmitir su herencia. He dicho un par de párrafos antes que la selección natural es el motor “casi único” de la evolución, ya que hay algunas tendencias de pensamiento que le adosan un complemento, un nuevo factor de selección distinto al medioambiental: la deriva genética.

Su propio nombre, deriva, da una pista de su alcance. La selección natural hace navegar con un firme rumbo. Todo consiste en estar en el momento indicado y en el punto preciso con las mejores condiciones. El resultado es que podrás pasar tu herencia con mayor fortaleza. Mientras que el proceso de deriva genética tiene que ver con el azar que la propia palabra deriva deja adivinar. Tiene que ver simplemente con las especificidades del mecanismo de transmisión de genes y la variabilidad aleatoria que se produce en el proceso, cosa que ya conocemos de la entrada 14 de esta serie. Dos progenitores pasan sus genes a la descendencia. Para cada gen del hijo el padre aporta uno de sus dos alelos -variaciones de un mismo gen- y la madre también uno de los dos suyos. Con lo que el descendiente dispone de un par de alelos adjudicados a través de un proceso

absolutamente aleatorio. Pueden ser alelos con “valor” evolutivo o “indiferentes”. No hay preferencias.

En esto consiste la deriva genética, en una variación del acervo genético de una población fuera de las normas de las mayorías, como una simple consecuencia del mecanismo de emparejamiento de genes. Pudiendo llegar el caso de que no es la selección natural sino la deriva genética la causa inicial de un nuevo fenotipo e incluso de una nueva especie. Y aún antes de haber hecho acto de presencia la selección natural, como creo que ayuda a entender el ejemplo siguiente.

La siguiente ilustración es una explicación muy gráfica del porqué de la deriva genética: el cuello de botella, circunstancia que puede ser asimilada al hecho de un aislamiento geográfico o genético experimentado por un determinado grupo poblacional. A partir de una población de fenotipo equilibrado en colores, se aísla un pequeño grupo que por azar es eminentemente azul (el motivo por el que ocurre no es importante ahora mismo, luego profundizaremos en él). Es fácil imaginar que con el tiempo la población resultante habrá cambiado su fenotipo medio y será mayoritariamente azul. Se puede haber creado incluso una nueva especie.



Analogía de la deriva genética (Wikimedia, dominio público)

Este proceso explica también el hecho de que a pesar de que la selección natural tiende a eliminar los componentes perjudiciales del genoma, sigan

apareciendo genes, incluso recesivos (que no se manifiestan si su alelo pareja es dominante) causantes de enfermedades graves o letales. Siempre hay una probabilidad, aunque sea mínima, de que el azar elija este gen alterado durante el proceso de transmisión de la herencia genética desde los padres a los hijos. Aunque sea perjudicial para el individuo.

Este es el contexto en el que los biólogos discuten profundamente hasta dónde el azar de la deriva genética puede “jugar” con el dictamen de la selección natural. A simple vista parece claro que la deriva genética no debería tener problemas para seguir con su aleatoriedad, incluso en aquellos casos que puedan ser dañinos. Sin embargo también parece razonable pensar que a largo plazo la selección natural quedará como juez supremo de la evolución.

El biólogo matemático japonés Motō Kimura ya planteó a finales de los 60's una variante de la visión anterior. Postuló que la gran mayoría de las mutaciones producen genes selectivamente neutros, es decir, no tienen frente a la selección natural ni más ni menos ventajas que los genes que sustituyen, por lo que la gran mayoría de los cambios evolutivos a nivel molecular son causados por la deriva genética, dejando un escaso protagonismo a la selección natural, que sin embargo él no negaba.

Un sencillo razonamiento matemático le permitió postular a Kimura que una variación genética beneficiosa, o un gen beneficioso ya establecido, se fijará en la población proporcionalmente al tamaño de la misma, al beneficio de la mutación y al éxito de la deriva genética entre generaciones con respecto a esta mutación. La conclusión no queda fuera de lo lógico. A su teoría se la conoce como la teoría neutralista de la evolución molecular.

Las causas que motivan los cambios

Hemos vistos los motores, y ahora pasaremos a comentar cuáles son las causas que motivan los cambios. Los procesos pueden ser variados según lo que se conoce de la observación de la realidad o según lo que la teoría soporta sólidamente:

- Cambios por azar de los genes a través de mutaciones producidas por acción de agentes externos. Dichos cambios alteran la secuencia de nucleótidos del ADN. Las consecuencias suelen ser la eliminación o cambio de pares de bases, o un desplazamiento de un tramo de la cadena o una alteración de las claves de corte y empalme de los exones. Incluso con bastante frecuencia se produce una duplicación de un tramo del ADN o una

división o unión de cromosomas completos. En definitiva, una nueva relación entre genes y una generación de nuevas proteínas.

Hay que precisar que contrariamente a lo que apoyan las teorías, podríamos decir, gen-atómicas, que postulan que cada gen es independiente, la realidad que se va constatando con mayor evidencia a medida que la genómica prospera, es que los genomas son objetos más organizados, con elementos que cumplen diferentes roles funcionales y entre los que se establecen múltiples interacciones. Por lo que resulta muy arriesgado el aceptar la tesis simplista de que los genes individuales son las unidades de selección o, mejor dicho, las únicas unidades de selección.

Sólo los cambios beneficiosos son los que mueven la evolución, ya que los perjudiciales serán a la larga eliminados por la selección natural. No obstante, se piensa, un poco en la línea de Kimura, que la mayoría de los cambios son neutros y que aunque pueden llegar a cambiar el fenotipo químico de las células con nuevas proteínas y relaciones entre genes, sus consecuencias serán neutras para la supervivencia, al no ser “vistos” por el medio ambiente que así no los somete a selección.

Las mutaciones en los genes son la probable causa de uno de los principales mecanismos de diversificación fenotípica y, por tanto, de diversificación evolutiva. Hablamos de la heterocronía, que consiste en el cambio de ritmo, o del momento en que se producen, de los procesos de desarrollo físico de los organismos. Lo cual diferenciará a la larga una especie de otra, inicialmente coincidentes. La principal pauta dentro de la heterocronía es el pedomorfismo, que puede resultar en una ralentización del proceso, por lo que podríamos decir que a final de vida el fenotipo es aún juvenil, o en una aceleración que adelanta la madurez sexual, la cual se produce en un cuerpo juvenil que continúa fenotípicamente así.

- Cambios en el acervo genético por aislamiento de poblaciones. Está probado que si separamos a una población en dos y las aislamos genéticamente (por aislamiento geográfico, por ejemplo) ambas poblaciones evolucionarán con el tiempo de forma divergente, aunque cada “isla poblacional” esté sometida a las mismas condiciones medioambientales. En estas “islas” cualquier mutación aprovechable sería respetada por el medio ambiente y con el tiempo, si es más eficiente que la alternativa más antigua, se extendería a toda la población en un plazo relativamente corto. La deriva genética interviene en gran medida en esta forma de cambio circunstancial de los genes.

La deriva genética es más espectacular en poblaciones pequeñas, muy por debajo del número de estasis -número máximo de sujetos que cohabitan en un medio ambiente sin sufrir una presión suficiente que derive en cambios genéticos (hay suficiente alimento, no hay depredadores,...)- ya que cualquier cambio favorable es más fácilmente trasladable al resto de la población, y así en poco tiempo hacerse dominante.

Esta es la hipótesis en donde se apoya una teoría muy afianzada, la del equilibrio puntuado, propuesta por los biólogos Stephen Jay Gould y Niles Eldredge. Postula que la evolución no es un camino lento y progresivo, sino que la aparición de nuevas especies se da de forma casi puntual, por aislamiento genético y deriva genética, tras lo que permanece estable en el tiempo durante muchos años hasta que se da otro episodio de especiación rápida. En principio esta teoría parece en franca oposición a la síntesis de la evolución darwiniana, pero en el fondo sólo varía en las formas. El motor del cambio es el mismo, y sólo varía el ritmo.

- Errores en los procesos de transmisión de genes por vía sexual, es decir, errores durante la fabricación de los cromosomas de los hijos, ya sea mientras son duplicados o mientras se lleva a cabo el proceso de recombinación durante la meiosis.

- Transferencia horizontal de genes. Es un proceso en el que un organismo transfiere material genético a otra célula que no es su descendiente.

Ejemplos hay, y muchos. Ya hablamos de la cesión de parte del genoma mitocondrial al ADN de las eucariotas. Incluso puede ser que un virus se incruste en la cadena del ADN de un hospedante. Dentro del mundo bacteriano está comprobado que este proceso es el principal mecanismo de expansión de los genes que les hacen resistentes a los antibióticos. Cuando una célula bacteriana evoluciona y consigue esta resistencia, puede transferir rápidamente estos genes a otras especies bacterianas.

- Por simbiosis. El proceso es similar al anterior, aunque el resultado pueda ser una modificación más importante. Dos seres se asocian para ayudarse, complementarse y encontrar un acomodo mejor en su medio ambiente.

Ya sabemos que una de las más conocidas en el camino de la evolución es la aparición de la célula eucariota, con sus mitocondrias y plastos, como ya se explicó en un capítulo anterior. En la naturaleza podemos observar múltiples ejemplos vivos de bacterias dentro de bacterias, y de éstas dentro de células de organismos más complejos, simbiosis en simbiosis.

Hablaremos aquí también de la controvertida teoría de la evolución hologenómica como un caso especial de simbiosis. No es una idea reconocida por la totalidad de la familia científica de la biología, aunque hay argumentos y pruebas que permiten aceptarla como una posibilidad. Se basa en el hecho de que todo animal o planta no es un organismo individual, sino un macroorganismo formado por ellos mismos y todo el conjunto de microbiota que recubre su superficie o trabaja en su interior. Por ejemplo, una vaca es una vaca más los millones de bacterias que trabajan en su aparato digestivo. Los unos sin los otros no tienen viabilidad. Al conjunto se le llama un holobionte y al conjunto de sus genomas el hologenoma. La teoría propuesta, entre otros, por los biólogos I.Z. Rosenberg y E. Rosenberg, afirma que el hologenoma se mueve casi como un todo, de forma que han podido comprobar que la asociación entre el hospedador y los simbioses afecta a la relación del holobionte con el medio ambiente. Bajo determinadas condiciones de presión externa el genoma de la microbiota evoluciona rápidamente y arrastra a la evolución del genoma del organismo hospedante, que dispone así de una ventaja para adaptarse al nuevo entorno de estrés. Todo esto sugiere que el conjunto de los genomas de los organismos que establecen la simbiosis pueden jugar un importante papel en la adaptación y en la evolución de los organismos superiores. El holobionte se comportaría por tanto como una unidad evolutiva.

- Por selección sexual. Los machos y las hembras parecen actuar de una forma caprichosa al buscar pareja y aparearse. Sin embargo, la realidad es que eligen atraídos por alguna característica específica del oponente. El gen que expresa la característica atractiva es el que se propaga y al final se impone en la población. Un ejemplo clásico es el de las aves del paraíso, con sus kilométricas y coloridas plumas de las colas que realmente son un estorbo para volar y escabullirse de los predadores... ¡pero atraen a sus hembras!

El ente que es el paciente de la selección y evoluciona

A pesar de la longitud que va adquiriendo este capítulo, no puedo cerrarlo sin hablar de cuál pueda ser la unidad evolutiva. Y en este campo, como en todo en la ciencia, hay tesis para todos los gustos. Aunque los avances en el conocimiento de los genomas y de su funcionamiento, así como de los factores que deciden los comportamientos individual o de grupo, parecen decantar la idea de que no hay una sola unidad, sino que la evolución actúa sobre todo ente en el que vemos que se puede producirse una variación su morfología y costumbres, que además legue sus rasgos biológicos a la

descendencia y en el que se pueda producir una variación en la eficiencia del éxito reproductivo -o replicativo-. Y aquí entran cosas tan variadas y diferentes como los genes, los sistemas de genes, las células, los individuos, los grupos o las especies. Es más, en un determinado momento pudiera producirse un “mix” evolutivo de todas o parte de estas unidades, lo que en algún caso se conoce como selección “multinivel”, por la que los comportamientos egoístas son vector y resultado de la selección individual y los altruistas lo son de la selección de grupo. No obstante cada una de las posibilidades tiene sus partidarios y sus detractores, y la literatura al respecto es extensa.

Hasta aquí hemos navegado comprobando la veracidad del hecho evolutivo, los motores que lo dinamizan, su ritmo, las causas de los cambios sobre los que apoya su quehacer y los posibles sujetos que la viven. En el próximo capítulo continuaremos el hilo principal centrandó nuestra atención en la posibilidad real del cambio.

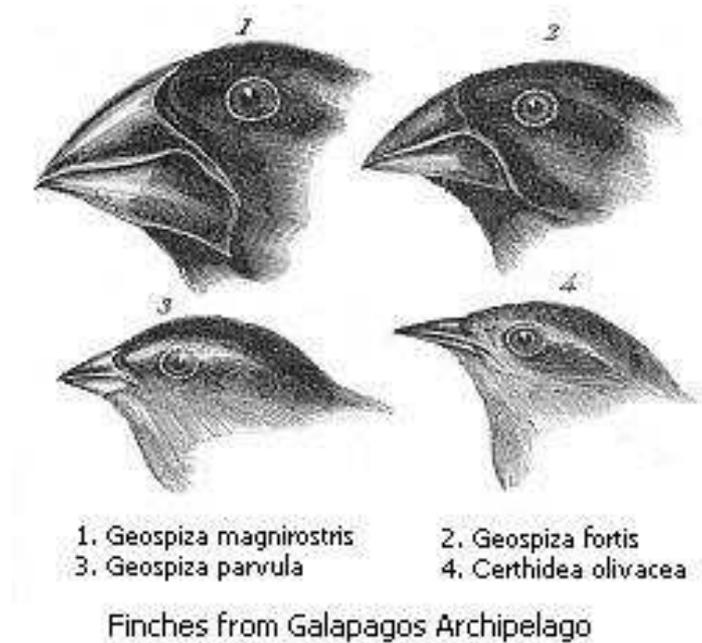
21. La posibilidad real del cambio

En el capítulo anterior analizamos el hecho evolutivo, los motores que lo dinamizan, su ritmo y las causas de los cambios sobre los que apoya su quehacer. Continuemos ahora el hilo principal centrando nuestra atención en la posibilidad real del cambio.

Partamos del inicio centrándonos en una segunda generación evolutiva, quizás con un ligero e inapreciable cambio externo, el hijo no muy distinto del padre, o bien con un cambio larvado en su interior que se expresará en un breve plazo de tiempo impulsando un rápido salto. En un caso o en otro, la generación hija se encontrará inmersa en un medio ambiente muy concreto, que le va a fijar las condiciones de alimentación, que lleva aparejado un entorno climático que condiciona sus habitats y que le monta un entorno de biota con la que tiene que competir. En este apartamento comunitario tiene que sumergir su propio organismo y pelear con sus nuevas capacidades individuales, ciertamente diferentes a las de sus padres. Éste es el sujeto de la acción.

En este momento hace su entrada la “*Juez Selección Natural*”. Juez sin capacidad de decisión, irremediamente previsible. Algo así como “¿Llueve? Luego me mojo”. Tan simple como: “la mutación no encaja en el medio ambiente, ergo no continúa; la mutación encaja en el medio ambiente, ergo continúa”. Si por casualidad la mutación ofrece una ventaja diferencial sobre los vecinos va a encontrar un hueco, y por tanto sobrevivirá, se expandirá y se impondrá. Éste es el dictamen.

Y éste es el resultado real y comprobable. Tenemos múltiples ejemplos ante nuestros ojos. El tan conocido de los pinzones de las islas Galápagos, que hizo rumiar su teoría a Darwin. En cada una de las islas los pinzones son diferentes, siendo así que debieron llegar todos ellos del lejano continente -a 1.000 kilómetros de distancia-. Lo debieron conseguir muy pocos individuos, una población muy escasa y, por tanto, una primera generación de individuos todos ellos iguales. Las ligeras diferencias medioambientales en cada una de las islas los desviaron por distintos caminos, desarrollando distintos fenotipos, todos sustancialmente diferentes al de sus abuelos, los pinzones del continente sudamericano de donde provenían.



Pinzones de las Galápagos (Wikimedia, dominio público)

Pero no todo es tan sencillo y evidente. Siempre surge la siguiente pregunta: si la evolución es tan paciente y avanza pasito a pasito, estos han tenido que ser tan numerosos que se habrá necesitado un periodo de tiempo casi infinito para conseguir el complejo escenario final que conocemos. Es lógico el planteárselo, pero también es obligado el intentar husmear entre las posibles explicaciones.

La evolución no es un proceso azaroso por el que de repente surge la organización. Ni siquiera cada uno de los pasos evolutivos son azarosos, en el sentido de que cada uno no supone un nuevo barajar de cartas, y si hay suerte sale la adecuada. Todo el proceso es una escalera y cada escalón se apoya en el anterior, no es un nuevo invento. Podrá ser un escalón infinitesimal, un infinitesimal de rampa, como propugnan los neodarwinistas, o podrá de vez en cuando producirse un escalón más grande, según postula la teoría del equilibrio puntuado. Pero cada escalón supone un paso de adaptación dentro de un medioambiente continuamente cambiante. Comenzar de nuevo en cada escalón y tener suerte es algo extremadamente improbable. Comenzar un escalón apoyado en las ventajas y adaptación del anterior incrementa en muchos factores la viabilidad de conseguir algo útil, de acuerdo a los patrones de utilidad que la Vida dibuja en cada momento.

Sabemos que la selección natural juega con los “dados cargados”. Aunque el elemento iniciador del pequeño paso es contingente, no así los resultados

que son modulados por la acción de dicho “truco”. No cualquier cambio es posible. El medio ambiente permite que sean viables sólo algunas jugadas entre todas las posibles, al reducir la red de posibles caminos por donde puede dibujarse esta serie, lo que incrementa en gran medida la probabilidad total de producirse la larga cadena evolutiva “primera-última generación”. A un nivel muy simple, la probabilidad de un doble seis jugando a la pareja de dados es $1/36$, mientras que si se juega con uno de los dados trucado, de forma que siempre salga el seis, la probabilidad pasa a $1/6$, es decir, se ha incrementado en un factor de seis. Y es que, además, en la naturaleza hay millones de jugadores independientes en paralelo. Ésta es la gran baza de la selección natural y, a la postre, de la teoría de Darwin.

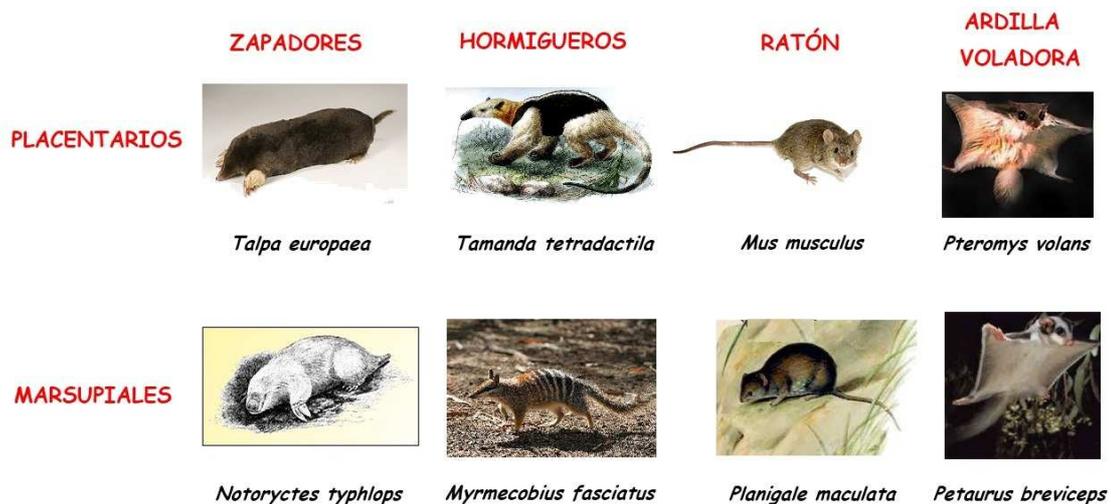
Cada pequeño avance fue una humilde y aprovechable conquista que fue útil en su momento, quizás en algo mínimamente diferencial, pero que llevaba en sí mismo la semilla de nuevos éxitos para el organismo afortunado, y lo sabemos porque su descendencia está hoy entre nosotros. ¡Qué poco parece una mejora de un 0,01%! Pero para un animal es mejor un 0,01% de visión que un 0%, como dicen Stephen J. Gould y Richard Dawkins. Mejor disponer de un 0,01 % de capacidad de vuelo que no gozar en absoluto de esta posibilidad. El animal que descubrió el avance sin lugar a dudas se movería con más comodidad por su ambiente. Que no pudiera ver formas y colores con su pequeño y rudimentario órgano visual no era el problema, porque veía sombras que le permitían adelantarse a la llegada del depredador. No podría cruzar océanos en un perfecto vuelo migratorio... pero podía sorprender a una presa en un torpe planeo desde lo alto de un árbol. La selección natural no pretende diseños perfectos, sino tan sólo mínimos avances que sean útiles para el organismo que lo consigue.

Creo que hay una realidad que afianza con rotundidad el concepto de sencillez e inevitabilidad del hecho evolutivo, lo que se conoce como evolución convergente, y que saldrá más de una vez a lo largo de esta serie. No se trata de un motor de cambio, ni de una causa que condiciona la evolución, sino de un resultado de la propia evolución sometida al juego de las presiones ambientales. Y, permaneciendo el resultado dentro de los esquemas generales, sin embargo se comporta de forma muy particular.

En líneas generales la evolución convergente se concreta en el hecho por el que especies diferentes, incluso lejanamente emparentadas en el árbol filogenético, y aisladas geográficamente o en el tiempo (lo que impide un intercambio de genomas) cuando son sometidas a condiciones de contorno

medio ambientales semejantes evolucionan hacia morfologías y hábitos muy parecidos ¿por qué la historia se repite en situaciones inconexas? ¿es significativo el hecho de que en todas ellas los códigos vitales -bioquímica, metabolismo, genética- y el medioambiente -clima, geografía, hábitat- sea lo único que mantiene una constante?

Es realmente interesante asomarse a algún mundo concreto de la evolución convergente. Es paradigmático el caso de los mamíferos placentarios y marsupiales. Llegado el momento, en esta serie hablaremos de ellos y de cómo divergieron por condicionamientos de un ineludible aislamiento geográfico: los continentes se separaban unos de otros. Y, sin embargo, en territorios diferentes los animales que ocuparon nichos similares, con el paso del tiempo adoptaron formas y costumbres similares. Mejor una imagen que mil palabras. A la vista de la siguiente estoy seguro de que os dais cuenta de los similares que son sus fenotipos a pesar de pertenecer a distintas ramas evolutivas de los mamíferos.



Mamíferos placentarios y marsupiales ejemplo de morfologías similares por evolución convergente (Imágenes de Wikimedia)

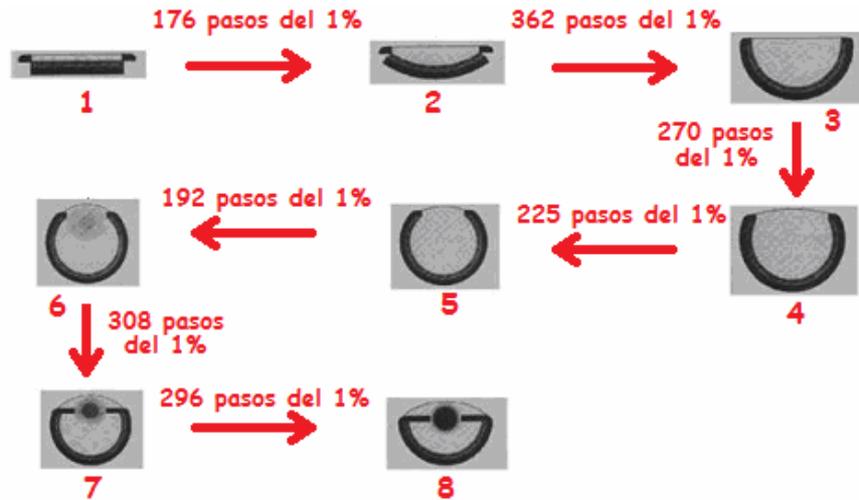
Otro claro ejemplo de evolución convergente es el hecho de que en animales tan dispares y con historias evolutivas emparentadas sólo en su inicio hace 590 millones de años, como los mamíferos y los cefalópodos, se hayan desarrollado ojos con estructuras tan similares. O el descubrimiento de membranas como herramientas de vuelo por reptiles como los dinosaurios o mamíferos como los murciélagos. O también las semejanzas de formas y conductas entre individuos de la familia de los sirénidos -manatís- emparentados con los elefantes, o de los cetáceos -delfines- muy próximos a los hipopótamos, e incluso de los pinnípedos -

focas- emparentados con los osos. Siendo todos ellos mamíferos, sorprendentemente unos lo son hervíboros y otros carnívoros.

Aunque las evidencias de que la evolución es un hecho natural más o menos probable e inevitable, siempre quedará como un problema el que la percepción de la probabilidad tiende a la subjetividad. Aún aceptando que no hay impedimentos biológicos para que surja a lo largo de miles de millones de años una larga cadena de ínfimos pero muy útiles cambios en el fenotipo de los seres vivos, la cuestión que sigue flotando es la de cuánto de probable hay en el proceso.

Hay un estudio teórico⁽³⁷⁾ sobre la evolución del ojo de los biólogos suecos D. E. Nilsson y S. Pelger en 1994 con los que se ponen números a la lógica duda. Simularon la evolución del ojo de los vertebrados -podemos asimilar el modelo al de un pez- con el objeto de estimar el tiempo necesario para su creación. Partían de un primitivo ojo fotorreceptor, formado por tres capas: una capa inferior opaca a la luz, una capa intermedia formada por células fotosensibles, y una tercera capa protectora formada por material transparente. Con este “ojo” simularon una población original de individuos, de forma que en cada generación se producían pequeños cambios al azar que afectaban al grosor de una de la capas o al índice de refracción de una zona parcial de la capa transparente. Impusieron la traba de que no podía haber más que una mutación por ojo en cada paso evolutivo. De acuerdo a la mutación observada calculaban un número que “medía” la calidad de la imagen. Si se veía que una variante nueva producía una mejor imagen, se seleccionaba de forma que las siguientes mutaciones tenían lugar en la población con esta nueva variante. Los resultados de la simulación fueron espectaculares. Si en el modelo se supone que se producen cambios del 1% de las unidades iniciales, en 1.829 pasos se consigue, como por arte de magia, un ojo en forma de cámara con lente de refracción, semejante a la de un pez.

¿Qué significa esto en número de generaciones? Considerando en el cálculo valores pesimistas del coeficiente de selección y de la heredabilidad, además de suponer que cada generación se renueva al cabo de un año, lo cual es muy normal en animales acuáticos pequeños, el número de pasos se corresponde con 364.000 generaciones o años. Esto es un instante de tiempo comparado con la magnitud del tiempo geológico. La primera evidencia fósil de un animal con ojos data de hace aproximadamente 550 millones de años, teóricamente hasta el día de hoy podría haber evolucionado el ojo de Nilsson y Pelger mil quinientas veces.



Serie evolutiva teórica que produce un ojo de vertebrado (a partir de Nilsson y Pelger, 1994)

El frío dato se presta a interpretaciones múltiples, como no podía ser de otra manera, pero el margen para corregir errores y generar posibilidades hace que estas interpretaciones podamos calificarlas, por lo menos, de muy conservadoras.

Y no hay más... ni menos. La Teoría de la Evolución por selección natural. Aunque cada uno es libre de tener su propia teoría... dentro de la lógica del método científico.

22. El camino de la diferenciación celular

En los anteriores capítulos hablábamos sobre el concepto de Evolución y cuáles eran las circunstancias que le acompañan. A partir de este capítulo vamos a desarrollar el análisis de temas muy particulares, resultados del modelado evolutivo. Se trata de la evolución de la complejidad, de cómo surge la diferenciación celular, la segmentación y los órganos directores, sustentadores o alimentadores de las células y organismos.

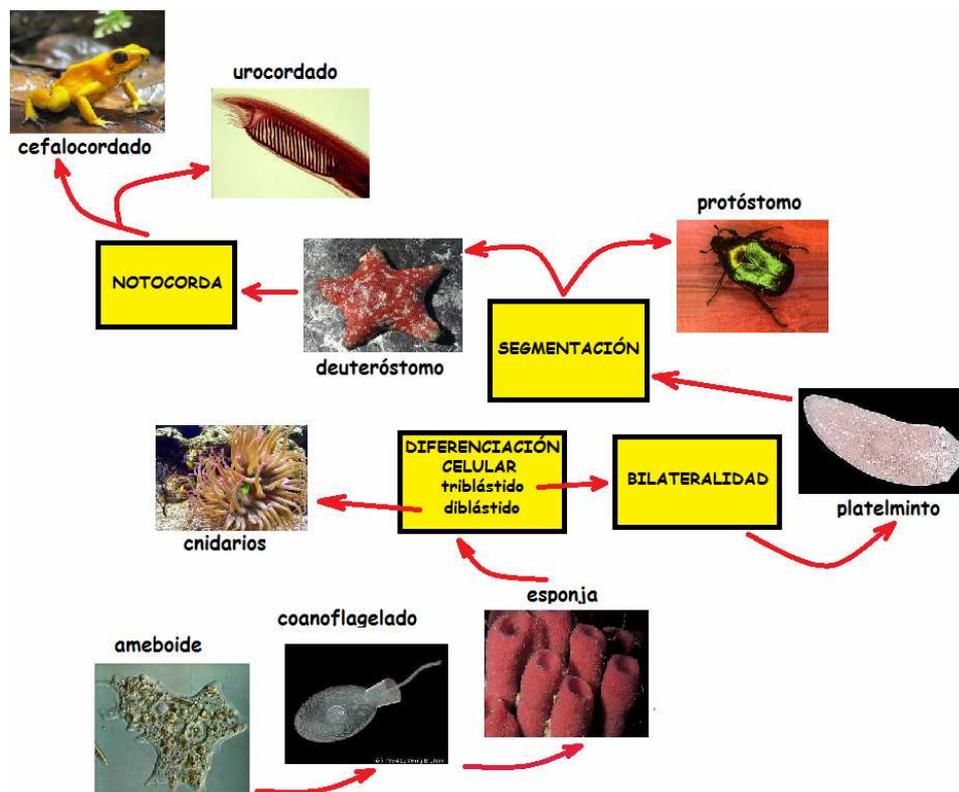
En el transcurso de nuestra narración cronológica habíamos llegado a la explosión del Cámbrico, la cual nos incita a hacer una parada y observar el inmenso paisaje desde sus alturas, contemplando los profundos cambios que ha experimentado nuestro planeta desde entonces. Desde los primeros protistas eucariotas hasta la actualidad, en donde las estructuras orgánicas se han complicado de tal forma que los mamíferos son presentados como paradigma de esta realidad, la maquinaria de vida de los seres se ha visto modificada a golpes del timón de la variación genética y la selección natural, golpes a veces suaves y en otras ocasiones enérgicos. De 600 a 700 millones de años nos contemplan.

Con un dibujo general del plano evolutivo, hablaremos del camino seguido para la diferenciación celular: cómo de una célula única del cigoto se llega a células variadas en forma y especialización.

La imagen siguiente dibuja las estrategias seguidas en el camino hacia la complejidad. Para entenderla mejor deberemos partir del primer momento del desarrollo embrionario, cuando se da a las células el manual para la vida, cuando se les dice cuál debe ser su cometido diferenciándolas unas de otras. El invento de la especificidad de estas instrucciones debió suceder hace unos 750 millones de años. Desde entonces los organismos han accedido a diversos caminos funcionales y morfológicos, perfectamente operativos. El resultado ha sido plural y siempre en forma de seres correctamente constituidos.

Como en algún punto tengo que comenzar, propongo que imaginemos el inicio de la historia de la complejidad en un momento en que un pequeño ameboide adoptó la originalidad de un **flagelo**, transformándose

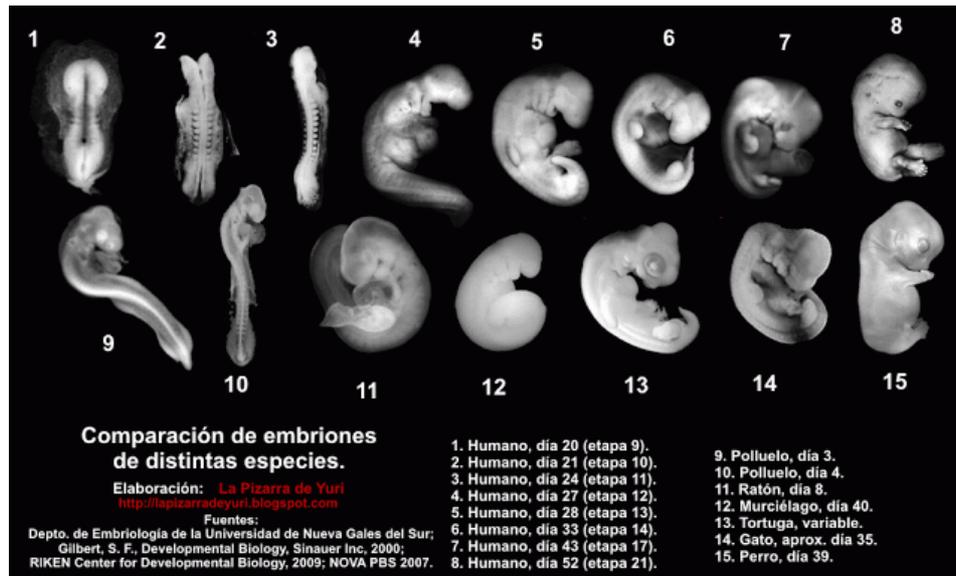
en un “nervioso” coanozoo. Unos cuantos de estos nuevos y activos colegas se agruparon formando un porífero -una esponja-, uno de los primeros seres con células organizadas en comunidad. Para poder avanzar por la historia, este animal necesitaba hacer más complejo su organismo, necesitaba un manual de instrucciones un poco más pesado, y lo consiguió haciendo una serie de retoques en el proceso de desarrollo embrionario que le permitieran pensar en novedosos tejidos y sofisticadas estructuras. Adoptó, hace unos 630 millones de años, la eficaz **simetría bilateral** para transformarse en un gusano plano, un platelminto, y desde entonces esta armónica disposición perdura hasta los vertebrados de hoy en día.



Camino secuencial de la aparición de la complejidad animal (a partir de imágenes de Wikipedia)

En algún punto del camino se multiplicaron sus planos de montaje corporal: aparece el **celoma** y se inventa la **segmentación**. Parecía que con eso estaba todo hecho, pero era cuestión de interpretar las instrucciones: dónde poner la boca, dónde poner el ano. Una alteración provocó el que se crearan dos grupos de familias que ya no se encontrarían nunca más: por un lado se fueron los protóstomos -artrópodos, gusanos y moluscos- y por otro lado los deuteróstomos -equinodermos y cordados-. La diversificación se produjo hace unos 590 millones de años. Aún hubo una última duda en la interpretación de las instrucciones que creó una nueva diversificación:

los urocordados abandonaron a sus primos los cefalocordados, los cuales se quedaron solos en la senda hacia los vertebrados. A partir de entonces ya sólo se produjeron cambios de forma y tamaño, que se realizaban ajustando en el panel de control la afinación del crecimiento de las distintas partes del cuerpo, estableciendo para cada animal y cada órgano unos coeficientes distintos de desarrollo. La figura siguiente nos permite visualizar esta afirmación con toda claridad.



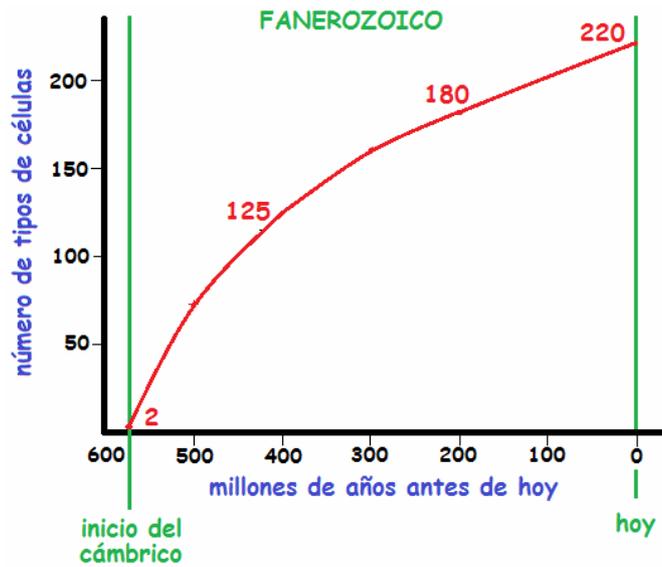
Una imagen autoexplicativa (obtenida del blog La Pizarra de Yuri)

Una vez dibujado el cuadro general de los avances morfológicos, nos acercaremos a algunos de ellos para tratar de entenderlos mejor. Veremos en los párrafos (y capítulos) siguientes que los procesos de diferenciación celular, simetría bilateral, segmentación y adopción de la notocorda, cuando alejamos nuestra perspectiva de la fría cadena cronológica y lo vemos como meros pasos del desarrollo embrionario, forman un conjunto imbricado y sin casi posibilidad de diferenciación entre ellos.

Empecemos por el principio, la diferenciación celular.

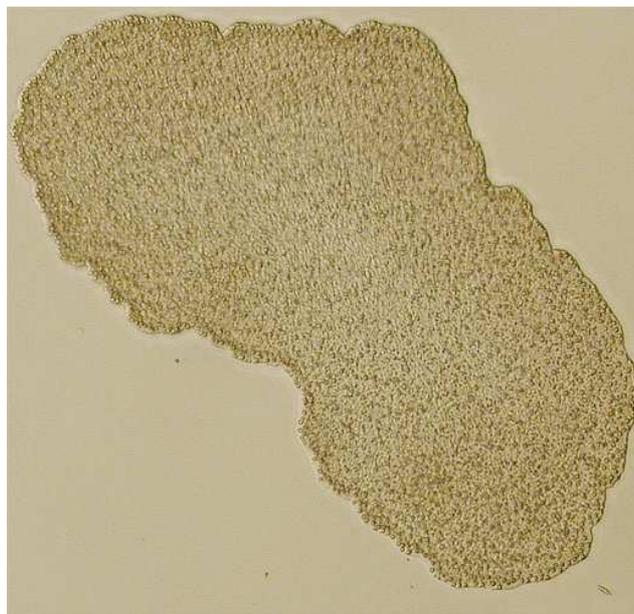
El camino de la diferenciación celular

James W. Valentine y otros colegas de la universidad de Berkeley postulan que así como la longitud del genoma podía ser un índice de la complejidad de las procariontas, la evolución del número de tipo de células especializadas -neurona, epitelial, muscular...- para la construcción del organismo de los metazoos es el mejor indicador para seguir la evolución de la complejidad morfológica en los animales.



Evolución del número de tipos diferentes de células en los animales

Veamos cómo se escaló la empinada curva de la figura anterior. Correría el año 780, en millones, antes de hoy, mucho antes de las esponjas y de extraños ameboides semejantes al actual *Trichoplax adhaerens*, un animal plano compuesto por multitud de células aunque ninguna de ellas especializada. En las aguas de aquel entonces, con toda seguridad algún ser vivo parecido, muy simple, comenzaba a explorar nuevas vías que aún tardarían mucho en concretarse. Alguna de estas opciones le llevaría a algo que se asemejaba a una especie de diferenciación funcional de las células.



Trichoplax adhaerens con un tamaño aproximado de medio milímetro
(Wikimedia, CC BY-SA 2.0 Germany)

Las esponjas y el amorfo *Trichoplax adhaerens* carecen de órganos y de la mayoría de los tejidos. Pero sus antepasados abrieron el excitante camino de la diferenciación celular, el proceso por el cual a partir de una sola célula patriarcal fueron apareciendo por evolución diversos tipos de células, con cometidos tan diferentes como pueden ser los digestivos o locomotores.

Un primer indicio lo vamos a encontrar en las primitivas esponjas, de las que tenemos noticias ya en el periodo ediacárico, hace 650 millones de años. En ellas todas las células están preparadas para hacer cualquier tipo de trabajo. Se especializan llegados el momento y la situación. No olvidemos que la estrategia de la esponja está a medio camino entre las cooperativas celulares y los tejidos. Junto a ellas los cnidarios tendrían ya unas unidades funcionales que actuaban como tejidos.

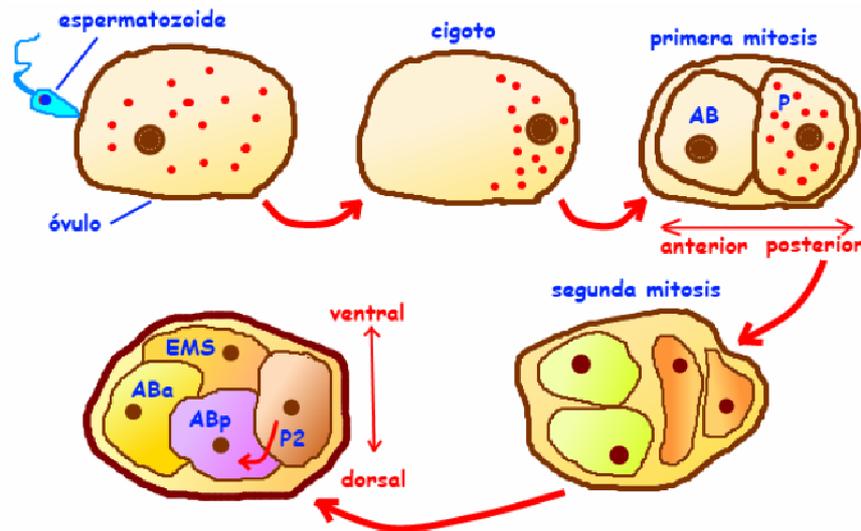
Muchos seres vivos provenimos de la fusión de dos células con un solo juego de cromosomas, una masculina y otra femenina. Como resultado se produce una sola célula con un juego doble de cromosomas emparejados. Sobre esta célula, el cigoto, recae la ardua tarea encomendada por toda una historia de diferenciación celular, la tarea de generar todo un organismo completo, con tejidos que tendrán distintas funciones, cada uno de esos tejidos con un tipo de células específico.

Todas las células de un embrión contienen la misma carga de genes, por lo que deberíamos deducir que no son los genes por ellos mismos, por el mero hecho de tenerlos, los que condicionan la diferenciación celular. Lo que diferencia unas de otras debe ser el subconjunto de genes que cada una de ellas expresa, es decir, el tipo de proteínas que se sintetizan en cada tipo de célula.

En los primeros pasos de desarrollo del cigoto ya se definen los ejes principales del embrión: delante/detrás y arriba/abajo. El proceso debe ser algo parecido a lo que se ha estudiado en el gusano *Caenorhabditis elegans*, del que, gracias a su simplicidad orgánica, que se reduce a 959 células cuando es adulto, se han llegado a conocer todos los misterios de su desarrollo, desde el huevo hasta el adulto.

En líneas generales el proceso se puede resumir así (ver figura de abajo): El espermatozoide penetra en el óvulo en una posición que definirá desde el primer momento un eje, e induce en el citoplasma del cigoto unicelular la creación de unos gránulos que son un conglomerado de proteínas. Estos gránulos se concentran en un extremo del cigoto. Cuando

éste se divide en dos células, una de ellas se lleva la mayoría de gránulos, la célula P, y con eso marcará en el posterior desarrollo la parte trasera del embrión. La otra célula, llamada AB, por el contrario, condicionará para siempre el polo anterior. Es decir, es el gradiente químico inicial de proteínas el que fija el eje antero/posterior del organismo maduro.



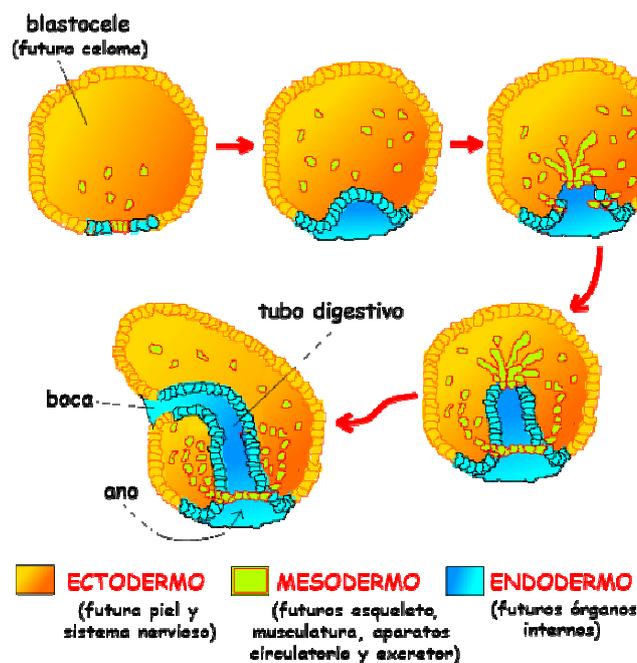
Dos primeras divisiones celulares del cigoto de Caenorhabditis elegans

Pasemos a la siguiente mitosis: de dos a cuatro células. La célula P se divide en P2 y EMS, y la AB en ABa y ABp. Por cuestión simplemente de tamaño del cigoto, la célula P2 sólo puede estar en contacto con la ABp, produciéndose un fenómeno de inducción mediante las proteínas que la primera envía a la segunda. Esta acción diferencia los dos tipos de células AB especializando a la ABp que en lo sucesivo fija el polo dorsal del embrión, formando con la célula EMS el eje dorsal/ventral.

Al ser el *Caenorhabditis elegans* un animal extremadamente sencillo, el proceso anterior de los primeros pasos de su embrión nos da una idea de lo que pudieron ser los inicios históricos de la diversificación celular y la fijación de una simetría bilateral. Lo importante es fijar la idea de que desde el momento inicial de la fecundación una cadena de activación de proteínas condiciona cómo va a ser el organismo futuro, y de cómo por mecanismos de inducción entre células, que también se dan entre grupos de ellas para singularizar a los tejidos, se dibuja el mapa de diferenciación en el proceso de división celular.

Algo semejante se ha observado estudiando las planarias, unos platelmintos bilaterales. Su cuerpo tiene la capacidad de regenerar su cabeza o su cola si se las ha seccionado. Pues bien, en el laboratorio se ha conseguido generar animales con dos nuevas cabezas, una delante y otra detrás, o invertir su vientre y su dorso simplemente manipulando cadenas específicas de genes, y por tanto las proteínas que expresan, que durante la embriogénesis definen en la mayoría de los animales sus ejes antero-posterior y dorso-ventral. Manipulando la que se conoce como vía de señalización Wnt/ β -catenina que define el primero de estos ejes, se conseguía la aparición de una cabeza en donde antes había una cola, es decir, una planaria con dos cabezas. Manipulando la vía de señalización conocida como BPM se llegaba al giro dorso-ventral del animal, lo que se traducían en que en la parte ventral se habían generado estructuras dorsales. Es evidente que este estudio de laboratorio aporta una evidencia acerca de que el comportamiento específico de las células y las especializaciones de las estructuras de los organismos son consecuencia de determinados patrones proteínicos que se generan cuando ciertas señales extracelulares activan o inhiben los genes adecuados.

Los planos de construcción de los organismos complejos son muy similares. El cigoto unicelular, formado por fusión de los gametos masculino y femenino, comienza un actividad frenética de divisiones mitóticas: una célula, dos células, cuatro células, ocho... y así en un proceso constante e interminable.



Fases iniciales del desarrollo embrionario durante la fase de gastrulación

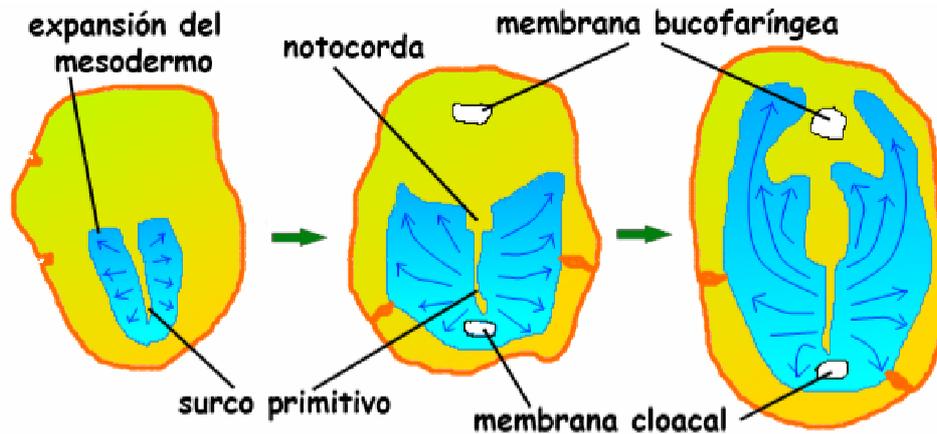
Tras las primeras tandas de divisiones se forma una especie de mora, una esfera de células, hueca, llamada *blástula*. Esta esfera, a medida que va creciendo, va tomando una forma más alargada, que se aplana adaptándose sobre la yema alimenticia que aportó el gameto femenino o sobre la estructura que luego va a desarrollar la placenta y el sistema de intercomunicación sanguínea madre-embrión, formando una especie de caparazón con un eje longitudinal y con una asimetría dorsal-ventral. Este eje está definido por una hendidura que determinará la simetría bilateral del individuo y su posición cabeza-cola. Durante el alargamiento aparecen los segmentos corporales, una especie de repeticiones como rodajas que van de la cabeza a la cola. Esta segmentación tiene una gran importancia ya que, como se explicará más tarde, es la base de la diferenciación de estructuras del organismo.

Tras esta fase, el embrión comienza una etapa de invaginación - *gastrulación*- por su extremo de cola, generándose una especie de tubo interno a la estructura externa: un tubo dentro de otro tubo. Son el endodermo y el ectodermo. Quedan por tanto definidos dos huecos que podríamos considerar concéntricos, el intermedio, que formará la cavidad interna del cuerpo, el celoma, que en los vertebrados acabará formando el tórax y abdomen, y el interno, que con el tiempo llegará a ser el tubo digestivo, definiendo el ano y la boca. Por ser una característica taxonómica que define las familias de *deuteróstomos* -equinodermos, tunicados y vertebrados- y *protóstomos* -gusanos, moluscos, insectos, crustáceos, arañas, escorpiones, ciempiés- comentaremos que en los segundos el primer orificio que se genera es la boca, mientras que en los deuteróstomos, como los mamíferos, es el ano.

El celoma merece una mención especial ya que hay teorías que apuestan por el hecho de que en este hueco corporal interno está el origen de un aparato locomotor complejo. Permitió a los animales celomados el “contorsionar” su cuerpo mediante el bombeo de líquido a través del celoma con lo que se producía un movimiento más versátil que el que se conseguía mediante cilios y flagelos, o con deformaciones de tipo ameboide. Esta gran ventaja les puso en bandeja, al poder moverse tunelando, un importantísimo nicho de alimentos como era el fangoso fondo marino repleto de residuos orgánicos acumulados durante milenios.

Tras esta necesaria puntualización sobre una de las ventajas que aportó el celoma, volvemos a la línea argumental de la diferenciación celular. En la siguiente fase se produce en el celoma un crecimiento celular sobre la pared exterior del endodermo. Comienza su desarrollo en posición del

extremo “cola” de la hendidura central, y va creciendo expandiéndose hacia los lados y hacia la posición “cabeza”, formando una tercera capa de tejido llamada mesodermo. Hay algunas excepciones en este proceso, ya que animales como las medusas o los pólipos -los diblásticos- no desarrollan esta tercera capa, generando una simetría radial y un solo orificio que hará simultáneamente de boca y ano.



Desarrollo de mesodermo durante la fase de gástrula (vista superior)

El endodermo desarrollará los órganos internos del animal, desde el aparato digestivo al respiratorio; el mesodermo desarrollará el esqueleto, los músculos y los aparatos circulatorio y excretor; el ectodermo, por fin, la piel y tejido nervioso.

Como hablaremos más tarde al comentar el desarrollo de la notocorda, primera estructura de sujeción y rigidez, y del sistema nervioso, se seguirán produciendo otras invaginaciones a partir de las tres capas de tejidos. Pero en este momento de desarrollo embrionario recordemos que tenemos algo así como un doble tubo concéntrico diferenciado longitudinalmente en segmentos.

Este diseño de desarrollo embrionario está absolutamente generalizado desde los gusanos y estrellas de mar hasta los mamíferos, y define claramente, conjuntamente con los genes Hox que lo provocan (de los que hablaremos más tarde), al reino Animalia.

A lo largo del anterior proceso, que hemos descrito de forma somera, está presente el gradiente químico proteínico inicial que ya veíamos en *Caenorhabditis elegans*. Esto hace que, según la posición en donde se encuentren, las células del embrión participen de entornos con diferentes concentraciones de sustancias clave, concentraciones que siguen un patrón

longitudinal, lo que provocará que la expresión de los genes sea distinta en cada una de ellas. Y al igual que los genes maternos en el óvulo produjeron el primer gradiente químico, como veíamos en el *Caenorhabditis*, los genes de cada una de las células se expresarán de forma distinta e inducirán nuevos gradientes químicos, que se irán entrelazando, dirigiendo la complejidad de la diversificación celular.

En este momento de la biografía de la vida hemos llegado a la realidad de un incipiente organismo triblástico, en el que ya encontramos atributos de bilateralidad, una cavidad interna -el celoma- y segmentación, dispuesto a seguir su camino. Antes de continuar con el análisis de estos avances orgánicos vamos a hacer de nuevo una pequeña digresión sobre un aspecto crucial de la diferenciación celular: El caso de la célula que decide diferenciarse por la vía del “altruismo”. Lo que veremos en el siguiente capítulo.

23. El caso de la célula que decide diferenciarse por la vía del “altruismo”

En el capítulo anterior nos habíamos introducido en el asombroso mundo de la complejidad. Conocemos ya por tanto los mecanismos por los que los seres vivos del reino Animalia pudieron llegar a diferenciar sus células para que realizaran funciones muy variadas. Hoy nos vamos a centrar en un caso muy particular, que en principio puede parecer un contrasentido: El caso de la célula que decide diferenciarse por la vía del “altruismo”.

Todos percibimos al organismo vivo, al conjunto de células y tejidos, como la “nave” portadora de las células reproductoras, que a su vez son meras herramientas de los genes, que las utilizan para su replicación y dispersión.

En el campo de la diferenciación celular y posterior especialización de tejidos, es muy peculiar el hecho por el cual *aparecen células somáticas separándose de las germinales*. Resulta curioso al preguntarse cómo es que en un conjunto de células, todas procedentes de un mismo cigoto inicial y por tanto con idéntica carga genética, algunas deciden “sacrificar” su mayor razón de ser, el reproducirse y dar nuevos seres independientes, quedando como simples células estructurales de un cuerpo, favoreciendo así a unas pocas, los gametos, que sí se especializarán en la reproducción. Parece un contrasentido, y sin embargo la opción, basada en la colaboración, se ha demostrado de un gran éxito.

Dejando al margen el hecho que parece evidente que la cooperación lleva consigo un vector de beneficio para los cooperantes, la explicación de que existan esta serie de células “altruistas” se basa en la idea de que para ellas también resulta valioso el conseguir que genes que son portados por una célula hermana, es decir genes iguales que los suyos, pasen a la siguiente generación, lo que asegura también su objetivo, que es tan sencillo como el hecho de que su acervo genético se perpetúe. La mejora del éxito de los parientes puede a veces compensar la pérdida de oportunidades que sufren los individuos altruistas. Este concepto de “selección familiar” (**kin selection**), que fue ideado por el biólogo

evolutivo británico William D. Hamilton para explicar el comportamiento social de algunos insectos, es perfectamente aplicable a nivel de célula: el ayudarte a ti supone una mejora para mis intereses. Dentro del conjunto de células hermanas alguna proteína da la señal externa “soy pariente tuyo”, señal que les ayuda a reconocerse y comportarse como un único ente evolutivo. Con el paso del tiempo se generó algún proceso de regulación tipo gen Hox (veremos en el siguiente capítulo quiénes son) que se encargaría de decidir qué célula de todas ellas sería la abanderada en la carrera de pasar el testigo genético.



Termitas Coptotermes formosanus un ejemplo muy evidente de sociedad de insectos movida por selección familiar. En colonias de tres millones de individuos sólo hay una pareja real reproductora. Otros individuos pueden coger el relevo en caso de envejecimiento de los anteriores o pueden ser los pioneros que se encarguen de generar nuevas colonias lejos de la propia de nacimiento (Wikimedia, dominio público)

El propio Hamilton consideró una norma aún más general que la anterior, que en teoría no tenía por qué exigir un comportamiento a ultranza de renuncia altruista. Partió de la misma idea: una nueva generación de genes como los “míos” puede surgir por dos vías, o a través de mi propia descendencia o bien a través de la descendencia de mis parientes. Por lo que lo más eficaz es optimizar la suma de ambas vías, lo cual no implica la renuncia de mi propia descendencia. A esta teoría se le llamó “eficacia total” (**inclusive fitness**) y puede propiciar respuestas parcial o totalmente “altruistas”. En algún momento el individuo puede optar por reproducirse y en otros momentos por ayudar a que sus hermanos, por ejemplo, tripliquen

su tasa reproductiva, opción con la que se incrementa en un 50% el éxito total del conjunto. De una proyección de los genes por dos vías, a una proyección por una vía única, pero de eficacia triple.

En realidad no es que una célula, o sus genes, tengan voluntad o decidan lo que hacer, sino que en un momento determinado, y por motivos circunstanciales, aparece en un ser estructuralmente sencillo un gen mutado que es “altruista”, o bien una novedosa interrelación “altruista” entre genes, circunstancia que al maximizar la “eficacia total” maximizaba la expansión de estos genes. Como resultado inmediato estos se propagan y llegan a buena parte de la población, generalizándose así la expresión “altruista”. Con el paso del tiempo se va pasando del sencillo organismo inicial a otros organismos más complejos, con más células y más especializadas, en los que continúa en sus genes la ventaja de la eficacia de la característica “altruista”. Incluso incrementándola, ya que se ve combinada con las nuevas ventajas de pertenecer a un organismo más complejo, de vida más larga y con una fase reproductora más extensa a lo largo de su existencia, lo que amplía sustancialmente las oportunidades efectivas de reproducción de sus copias.

A la vista de los patrones tan similares que podemos contemplar hoy en día a nuestro alrededor en algunos organismos vivos, este proceso no debió resultar un gran contrasentido en los momentos iniciales del invento del “altruismo”. No deja de ser un ejemplo más de cooperación de individuos con una misión, que es el éxito del objetivo del conjunto, la propagación de su genoma. Este comportamiento se asemeja mucho al de la cooperación de células dentro de un organismo individual. Veamos pues algún ejemplo actual de lo que decimos.

Uno de ellos es la esfera acuática hueca formada por las algas unicelulares flageladas *Volvox*, que adoptan esta forma de organismo societario quizás como una estrategia contra la depredación mediante el truco del incremento de tamaño.

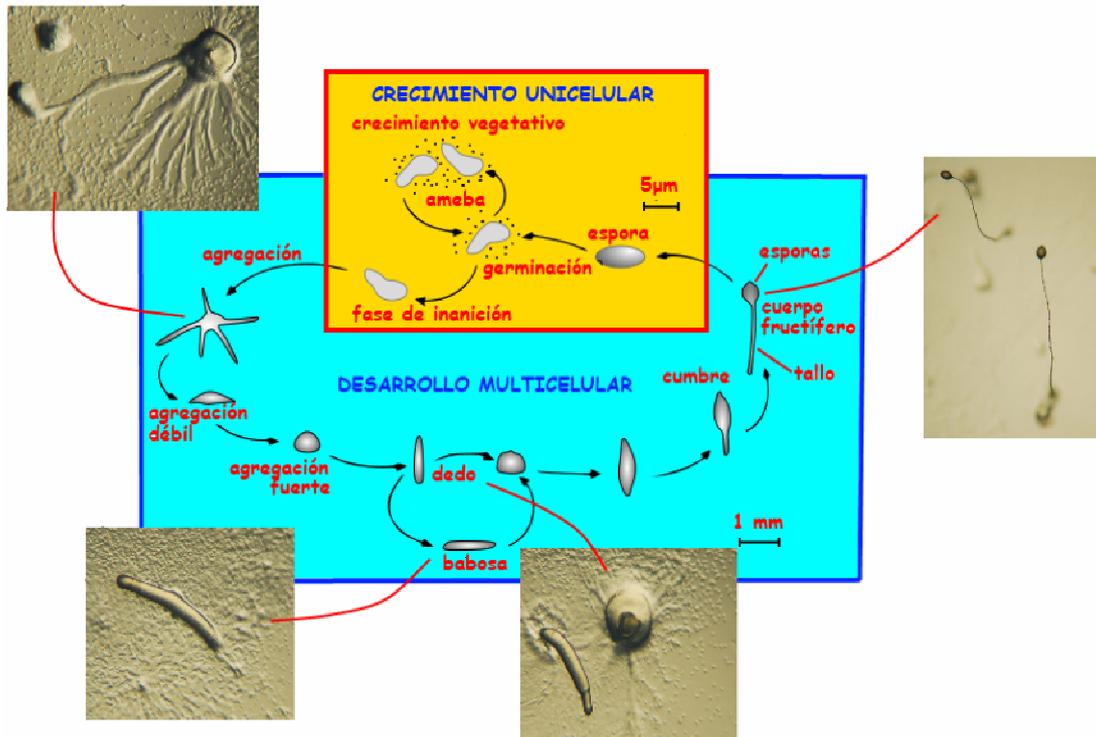
Todas las células son estructurales y están unidas por conexiones citoplasmáticas, formando la superficie de la esfera. Menos unas pocas que adoptan la función reproductora, las oosporas, y que aparecen en el ecuador de la esfera para más tarde mudar a su interior. Para liberarlas, la esfera se da literalmente la vuelta como un calcetín, suelta sus células sexuales y se rehace al revés. La pregunta que queda en el aire es: ¿por qué algunas células se transforman en germinales y el resto, que trabajan para ellas, no?



Volvox aureus con las oosporas, de mayor tamaño, en su interior
(Wikipedia, CC BY-SA 3.0)

Otro ejemplo más curioso si cabe es el de los mohos mucilaginosos acrasiomicetos colonizadores de muy diversos medios, como el *Dictyostelium discoideum* de la imagen de más abajo. Se trata de seres unicelulares, de constitución ameboide, que en condiciones de bonanza medioambiental y de alimentación, hacen su vida de forma independiente. Sin embargo, cuando el entorno se hace agresivo para su supervivencia comienzan a excretar una sustancia llamada “*adenosín monofosfato cíclico*”, una señal química que cuando contacta con otro individuo le excita para que segregue a su vez más producto “llamada”, induciéndole a moverse hacia un punto de reunión que resulta ser el lugar donde esta sustancia presenta una mayor concentración.

En este punto se acumulan una gran cantidad de células, formando una especie de brazo vertical que con el tiempo bascula y se coloca horizontalmente sobre el suelo. Allí empieza un movimiento sincronizado de toda la colonia de ameboideos, haciendo que la masa se mueva como una babosa. Cuando llegan a un lugar iluminado se produce una revolución: la babosa se yergue sobre unas cuantas de sus células que quedan formando una pedúnculo con su base sustentadora, y otras “trepan” hacia la luz, estirando el nuevo cuerpo de la colonia. El 80% de células consiguen una posición elevada que les dará carta de reproducción y originarán una nueva generación de esporas. El 20% de la base sólo quedarán como eso, como soporte de las que se van a reproducir, para luego morir.



Proceso donde se describen los distintos estadios por los que pasa el cuerpo fructífero de Dictyostelium discoideum (a partir de Wikimedia, esquema, GNU FDL 1.2, y fotos, dominio público)

¿Qué es lo que diferencia a unas de otras de forma que realicen unas funciones tan dispares? ¿cuál es la señal que convierte a algunas células en altruistas? ¿es algo parecido al proceso de diferenciación celular con gradientes químicos como motores de la diferente expresión de los genes en cada individuo? ¿es consecuencia de la evolución dentro de la “eficacia total” de Hamilton, aunque pueda ser que las amebas iniciales no fueran parientes?

De todas formas, se ha descubierto que no todo es tan bonito y “generoso” en los mucilaginosos, extensible a otras células cooperantes. Algunas células engañan al sistema haciendo trampas para darse a ellas mismas más probabilidades de sobrevivir. Y como sucede con todos los tramposos, los trucos deben de estar evolucionando constantemente para contrarrestar las contramedidas que la comunidad aplica como defensa de su eficacia reproductiva. De todas formas el engaño sólo funciona si se realiza en presencia de “no tramposos”: se da el hecho de que si los “tramposos” están rodeados de otros iguales, todos se hermanan y de nuevo contribuyen en grupo al esfuerzo colectivo, como si no hubieran sido carteristas profesionales.

No es evolutivamente concebible un futuro en el que el gen de las trampas se hubiera diseminado por toda la población, ya que entonces la carrera competitiva que se generaría no permitiría formar el cuerpo fructífero al faltar células para su base (no habría altruistas, todas serían tramposas), por lo que no podría reproducirse ninguna y desaparecerían como especie.

¡Cuántas lecciones evolutivas nos hemos encontrado al seguir la pista de las células “altruistas”! Es sorprendente cómo los resultados de la evolución, consecuencias maquinales de las circunstancias ambientales, se ajustan a parámetros racionales o de comportamiento de los humanos ¿Será acaso que somos resultado de esta evolución?

En el siguiente capítulo continuaremos con la historia de los organismos multicelulares triblásticos, aquellos cuyas células habían aprendido a colaborar especializando sus funciones hasta el grado extremo de no hacer uso de su capacidad reproductora en aras a una mayor eficiencia. Seguiremos analizando sus características de bilateralidad y la capacidad de segmentación que ya llevaban implícitas en sus organismos.

24. Dos nuevas habilidades: Bilateralidad y segmentación

En los capítulos anteriores comenzamos a desarrollar lo que llamaba la evolución de la complejidad. Cómo los seres del reino Animalia fueron evolucionando sus organismos hasta los fenotipos habituales para nosotros, habitantes del siglo XXI. En el capítulo 22 hablamos del concepto de la diferenciación celular, y en el siguiente, el 23, desarrollamos un curioso caso particular, el caso de la célula que decide diferenciarse por la vía del “altruismo”.

Ahora continuaremos con la tarea tratando brevemente la conquista de la simetría bilateral para seguir con el sorprendente proceso de la segmentación corporal.

El camino de la simetría bilateral

Estamos situados en el planeta Tierra de hace 600 millones de años. Nos tenemos que adentrar en el periodo ediacárico -o quizás cien millones de años como algunos opinan- época de donde tenemos datados fósiles de los que se duda si son de la biota ediacara o bien formas aún más primitivas de seres vivientes. El fósil más antiguo de este tipo, ya bilateral, es *Vernamicalcula* descubiertos en la formación de Doushantuo en China. Su identificación está en discusión, ya que algunos especialistas lo consideran la parte interior de un saco de huevos o quizás un acritarco.



Spriggina flounensis (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Ejemplos más recientes, aceptados casi universalmente como bilaterales, incluyen a *Kimberella* (de la que ya hablamos en la entrada del Cámbrico), parecido a un molusco, *Spriggina* (¿anélido o artrópodo?) y *Parvancorina*, con forma de escudo y parecido a un trilobites del Cámbrico.

A la vista de la gran cantidad de animales, vivos o extintos, que desarrollan una simetría bilateral en sus organismos, hay que afirmar que este tipo de morfología debe presentar una serie de ventajas evolutivas de gran éxito. Intentaremos imaginar cuál fue el camino y el porqué del paso desde la forma ameboide a la estructura corporal bilateral.

Cuando estudiamos el mecanismo de la especialización celular hablamos de que el sistema de expresión de los genes maternos había seleccionado una proteína que fijaba el inicio de la simetría de su embrión ¿Por qué pasó eso? Una consecuencia más del poder evolutivo de la selección natural. Dejemos que nos lo cuente el magistral zoólogo Richard Dawkins que en su libro “*El cuento del antepasado*” nos da una magnífica explicación casi cinematográfica del porqué:

“Cualquier animal que se tenga que desplazar de un punto a otro, en vez de permanecer estático, absorbiendo agua con nutrientes, probablemente necesitará un extremo frontal especializado. Una cabeza. El posible alimento llegaría, para este animal, desde el extremo de la cabeza, por lo que es fácil imaginar que en ella se abriría el orificio para alimentarse, así como los detectores para conseguir más fácilmente el alimento, como pueden ser tentáculos táctiles, órganos olfativos y visuales. A la par, es lógico pensar que la mayor concentración de tejido nervioso se diera cerca de estos órganos sensitivos y cerca del principal centro de acción, el aparato con el que capturaba su alimento.

Así que podemos definir a la cabeza como extremo director, el que tiene la boca, los principales órganos sensoriales y el cerebro, si es que lo tiene. Otro mecanismo con lógica sería el que las sustancias residuales del animal se expulsasen por el extremo contrario al de la boca, para dificultar el reciclado de estos residuos.

Tendríamos pues una especie de gusano primigenio que ha conseguido aprovechar las oportunidades que le da una asimetría delante-detrás, ¿y por qué no también una asimetría arriba-abajo dorsal-ventral?

Basándonos en la realidad de la fuerza de la gravedad saltan a la vista las inevitables diferencias que existen entre “arriba” y “abajo”. Abajo es donde está el fondo marino, es donde uno se puede apoyar para moverse,

arriba es de donde llega la luz solar, de arriba es por donde vienen las cosas que caen sobre uno. Los peligros, por tanto, no son los mismos si vienen de arriba o de abajo. Así que nuestro primitivo gusano no tuvo más que desarrollar una parte superior, o dorsal, especializada para las amenazas y oportunidades que le venían de arriba, de la parte luminosa, así como una cara inferior, o ventral, también preparada para lo que le venía de abajo, del fondo del mar.

Con estas dos asimetrías, delante/detrás y arriba/abajo, automáticamente quedan definidos ambos lados, izquierdo/derecho. Pero, a diferencia de los otros dos ejes, no hay motivos para diferenciar entre el lado derecho y el izquierdo. El peligro puede venir de la misma manera desde la derecha como por la izquierda. No hay una razón especial que le permita encontrar más comida por un lado que por el otro, aunque sí habría diferencias entre las capas de aguas más superficiales o más profundas”.

Es más, añadiremos, no resultaría muy conveniente el tener derecha e izquierda desiguales, ya que supondría un ineficaz sobreesfuerzo de coordinación tanto para alimentarse como para moverse, o para supervisar el amenazante entorno. Por tanto, parece lógico que cualquier modificación novedosa que hubiera sido buena para el lado derecho lo tenía que ser también para el izquierdo, ¿en razón de qué iba a ser lo contrario?



Detalle de la cabeza del lenguado con los dos ojos en el mismo lado, el izquierdo. Puro arte contemporáneo (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

No obstante, comentaremos aquí como curiosidad el caso del lenguado y el de sus colegas las platijas y los gallos. Después de haber ensalzado las ventajas de la bilateralidad, a este animal habría que calificarlo como un

irresponsable, ya que nace con esta simetría y poco a poco adopta un esquema picasiano. A medida que pasan los días se recuesta en el fondo del mar sobre su lado derecho. Como sólo vería con el ojo que queda libre, el izquierdo, su situación sería muy precaria. Así que poco a poco tuerce la boca situándola en posición arriba/abajo, y traslada a su ojo derecho junto al izquierdo, los dos mirando hacia la superficie luminosa. Misteriosamente, su orientación derecha/izquierda pasa a ser una deformada arriba/abajo.

El camino de la segmentación

El concepto de segmentación se refiere a la repetición de unidades anatómicas casi idénticas en los cuerpos de animales y vegetales: los segmentos. Ya en algunos organismos de los ancestrales platelmintos aparecen rudimentos de esta estructuración, claramente manifestada en los artrópodos, insectos o cordados. Ello nos permite pensar que, si nos remontamos hasta el más antiguo ancestro común de todos ellos, veríamos que debía ya participar de alguna manera de segmentación. La datación basada en los genes nos llevaría a una época en el entorno de hace 630 millones de años.

Este fenómeno permite un alto grado de especialización de las regiones corporales, por lo que los científicos creen que en la segmentación podría estar el origen de la diversidad y de la longevidad de los grupos animales más extendidos del mundo. Resulta mucho más eficiente para un animal el que gestione su actividad por medio de la repetición de bloques corporales especializados, los segmentos, antes que generalizar en todas y cada una de las partes de su organismo cualquier tipo de función.

Se conoce como metámero a cada uno de los segmentos que se repiten en ciertos grupos de animales con simetría bilateral y celoma. Cada metámero tiene cavidades celómicas, que como sabemos aparecen durante la gastrulación del embrión, separadas de las de otros metámeros por tabiques. Los órganos y sistemas tanto internos como externos de uno de esos animales pueden estar repetidos en cada metámero. Por ejemplo, en los artrópodos cada metámero puede llevar al menos un par de apéndices, que pueden ser patas, antenas o branquias en el caso de los acuáticos.

Los insectos tienen la cabeza formada por seis segmentos, que no son muy evidentes, en el nº 2 salen las antenas, y en los posteriores las mandíbulas y otros adminículos bucales. Les siguen claramente tres segmentos torácicos, cada uno llevando un par de patas y los dos últimos suelen desarrollar un

par de alas cada uno. Más allá de los segmentos torácicos aparecen los abdominales, normalmente once. Cada célula de cada segmento “sabe” dónde está y “sabe” lo que tiene que hacer.



Scolopendra cingulata mostrando claramente la segmentación de su cuerpo en metámeros (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

La metamerización se da también de modo característico en el filo de los anélidos e incluso en los vertebrados, aunque en este último grupo no es tan evidente porque a lo largo de la evolución del grupo ha habido múltiples modificaciones, fusiones y reducciones de dichos metámeros, perdiéndose parcialmente la apariencia metamérica externa.



Fotografía de un grupo de Equisetum telmateia en la que se puede observar sus tallos segmentados (Wikipedia, CC BY-SA 3.0)

No nos olvidemos de que algo semejante a la segmentación también es una opción que usan las plantas, aunque no parece que sea buscando la eficacia en el reparto orgánico de la especialización, sino como solución en la carrera armamentística por conseguir las alturas y por tanto la luz solar. Para ellas la segmentación es una buena solución estructural para crecer. Un buen ejemplo lo encontramos en las equisetáceas, ancestrales plantas con un extenso registro fósil del Devónico y Carbonífero.

Volviendo a los animales, es obligado hacerse las siguientes preguntas: ¿Cuándo se produjo el salto hacia la segmentación? ¿Y por qué?

A partir de estudios filogenéticos⁽³⁸⁾ realizados por investigadores franceses del Centro de Genética Molecular del CNRS y de la Universidad Paris Diderot, se ha demostrado que la segmentación de los embriones de animales tan distintos como una mosca – artrópodo- o un gusano – anélido- la dirigen los mismos tipos de genes, lo que nos ayuda a pensar que esta característica biológica apareció por primera vez⁽³⁹⁾ en un ancestro común que habría vivido hace unos 600 millones de años.

Llevar a cabo la segmentación durante el crecimiento de un embrión implica una labor de coordinación muy precisa, ya que a lo largo del proceso se va dando una activación progresiva de algunos genes específicos. En alrededor de 48 horas se han de completar el desdoblamiento de las capas repetitivas que acabarán conformando el cuerpo del embrión, comenzando por las más próximas a la cabeza y acabando con las de la cola.

Los seres humanos estamos formados por más de treinta capas paralelas a lo largo del eje que dibuja la columna vertebral, que se corresponden más o menos con el número de vértebras que tenemos. Durante la etapa fetal y en la niñez hay 33 vértebras. Durante la etapa adulta sólo quedan 24, debido a la soldadura de las que formarán los huesos sacro y cóccix.

Según los datos anteriores, durante el desarrollo embrionario deberán generarse 33 metámeros en dos días. Y así es. Exactamente cada hora y media se genera un nuevo segmento. En este proceso, los genes que se van a expresar en los futuros segmentos se activan con exactitud en el momento preciso, uno detrás de otro, empezando por los de la cabeza y acabando con el último del cóccix. El desarrollo de esta sucesión es un proceso de alta precisión que no admite fallo ni alteración temporal, ya que, si no, los miembros aparecerían en lugares erróneos del cuerpo.

Pero, ¿cómo saben los genes que deben actuar de una manera tan sincronizada?

El ADN esconde la respuesta a este mecanismo. De hecho son unos genes muy específicos, los Homeobox -más conocidos como Hox-, los implicados en este proceso. Estos genes están situados con exactitud unos detrás de otros en la cadena de ADN, formando en todos los vertebrados tetrápodos, incluido el hombre, cuatro grupos como cuatro convoyes de vagones de tren. En otras especies el número de convoyes varía.

Parece sorprendente la existencia de estas cadenas de genes similares, pero existen evidencias que corroboran la formación de los cuatro complejos de genes Hox en vertebrados a partir de uno único ancestral, probablemente como consecuencia de duplicaciones y posterior divergencia.

Aunque la mecánica del proceso es igual en todos los animales, particularizamos aquí el caso de los humanos. En los primeros momentos del embrión los genes Hox están inactivos, permaneciendo enrollados como un carrete de hilo dentro del ADN. En el momento preciso la cadena de ADN comienza a desplegarse. Cada hora y media actúa enviando instrucciones de forma progresiva a los Hox, consiguiendo así la secuencia adecuada. Los genes que codifican la formación de la zona cervical se activan los primeros. Lo mismo ocurre más tarde con los genes correspondientes al desarrollo de las vértebras torácicas, lumbares, sacras y coccígeas. El embrión comienza así a formar sus capas.

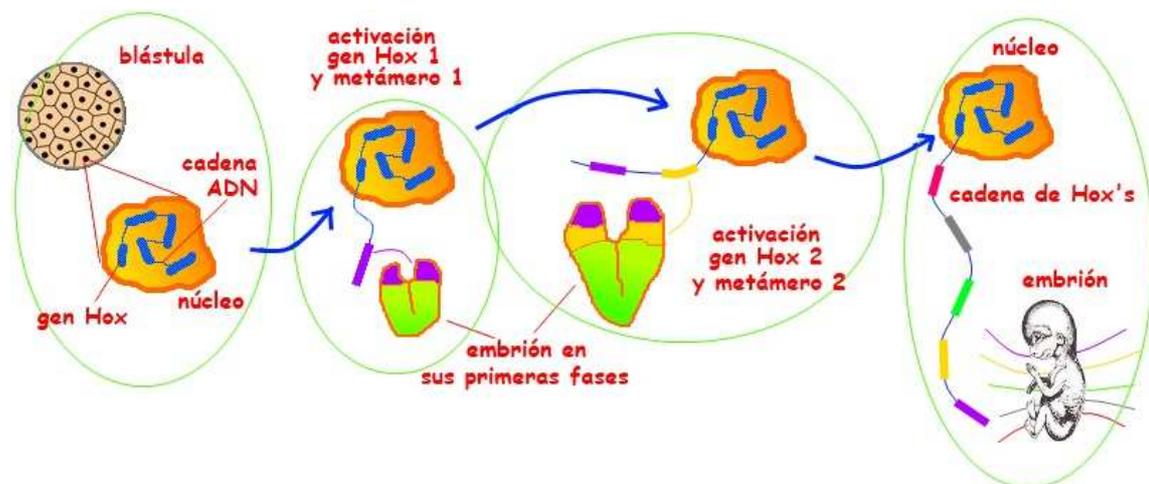


Diagrama del mecanismo de formación embrionaria y la relación de ésta con los genes Hox

Podría pensarse que cada metámero tiene activado su particular gen Hox y desactivados el resto. Pero esto no puede ser así, pues sólo hay trece tipos

de genes Hox y los metámeros son muchos más, hasta 33 o 34. La explicación la encontramos una vez más en los gradientes químicos dentro del embrión. Cada gen Hox se expresa preferentemente en un segmento, pero también se expresa en los segmentos posteriores, cada vez con menos “potencia” y de una forma gradual. Por lo tanto, en cada segmento hay un cóctel diferente de influencias de genes Hox. Simplificando mucho, podemos decir que ésta es la herramienta que utilizan las células para saber en qué segmento se encuentran: “compara” las químicas de su segmento con las del anterior y el posterior.

Una vez que cada célula sabe dónde está, ya sólo tiene que seguir las instrucciones que le dicta el mar de proteínas en donde esta inmersa. Así, un segmento desarrollará el corazón y otro desarrollará la vejiga: partiendo de un mismo patrimonio genético se han activado y desactivado los genes necesarios para una organogénesis diferenciada.

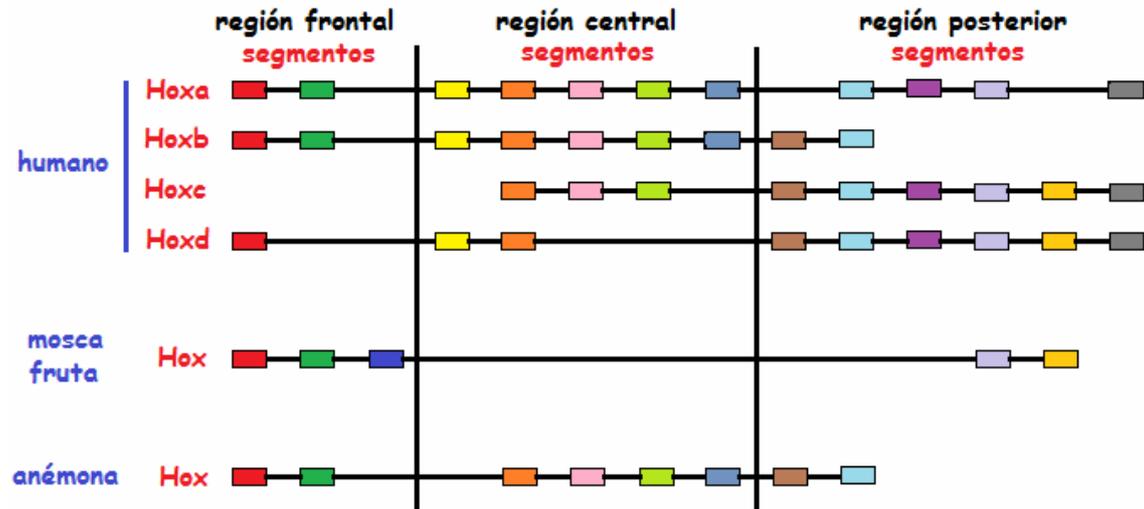
Ya sólo le queda a la selección natural el dirigir los ritmos de crecimiento. Dar órdenes para que se desarrolle más o menos la nariz y será un elefante o un hipopótamo; o que tenga el tórax redondo y será un cangrejo, o que lo tenga alargado y será un langostino. Es cuestión de “simples” crecimientos diferenciales.

No quiero dejar el tema de la metamerización, punto básico de partida en el modelado de los organismos, sin volver a hacer énfasis en lo que me parece el importante mensaje que nos están enviando cada uno de los segmentos de un animal.

Los genes Hox y otros colegas, como las proteínas Noggin o los BMP, modelan la estructura externa e interna de los cuerpos. Pero lo más importante es que estos genes participan en mayor o menor proporción, los mismos genes, en el desarrollo de los embriones de todos los organismos animales, desde una anémona, una mosca de la fruta o un ratón hasta un humano. En cualquier animal, ya sea actual, complejo o primitivo como una esponja, o ya fósil como un trilobites. Variarán en cantidad o proporción, expresando un distinto número de segmentos o diferentes formas corporales en cada uno de ellos. Pero su función e interrelaciones son y fueron siempre las mismas, lo que consolida en gran medida la idea de una unidad de Vida.

En la gráfica siguiente se ha representado la estructura de genes Hox de un humano, una anémona y una mosca de la fruta, dentro del cromosoma o cromosomas portadores. La anémona tiene Hox en un solo cromosoma. El

hombre tiene cuatro juegos -uno en cada uno de cuatro cromosomas distintos- que han aparecido tras una doble duplicación, de uno a dos y posteriormente de dos a cuatro, que se habría producido a lo largo de su cadena evolutiva. De ahí la gran semejanza entre el tipo de sus Hox con los de la anémona, por ejemplo. Cada rectángulo de color representa un gen Hox que expresa proteínas en un segmento determinado de sus cuerpos, siendo el código de colores válido e idéntico para los tres animales.



Genes Hox y su posición según segmentos y especies

La importancia de estos genes en la evolución es clara. Pudieron ser decisivos como promotores del nacimiento de una nueva especie. Basta que mute uno de ellos, basta que se mueva de lugar en el cromosoma que los lleva, para que exprese en un segmento un tipo de proteínas diferentes a las que expresaba en el mismo segmento antes de la mutación. Un solo cambio en un Hox podría generar una nueva morfología animal, que si fuera favorable en el nicho ecológico de partida, a la larga podría desarrollar una generación de descendientes formando una nueva especie. Este es un argumento favorable a la tesis comentada de evolución de especies por equilibrio puntuado: la nueva especie puede aparecer casi de repente, por mutación puntual y rápida de un gen Hox, y no acontecer otra especiación en mucho tiempo, a escala geológica, hasta que el azar aporte un nuevo cambio en el mismo u otro Hox, cosa escasamente probable pero posible.

A partir del próximo capítulo comenzaremos una serie de ellos hablando de cómo se consiguieron desarrollar los principales órganos de estos animales.

25. Evolución de la notocorda y el sistema nervioso

En los capítulos anteriores hemos caminado a lo largo de los diversos pasos que llevó a los animales hasta la variada complejidad de sus fenotipos. A partir éste desarrollaremos en sucesivos capítulos la evolución de los principales sistemas, aparatos u órganos de sus cuerpos. Recuerdo que no voy a seguir fielmente el devenir cronológico de los hechos, sino que me centraré en cómo evolucionó un aspecto concreto, independientemente de en qué periodo temporal se desarrollaron los acontecimientos.

Evolución de la notocorda y del sistema nervioso

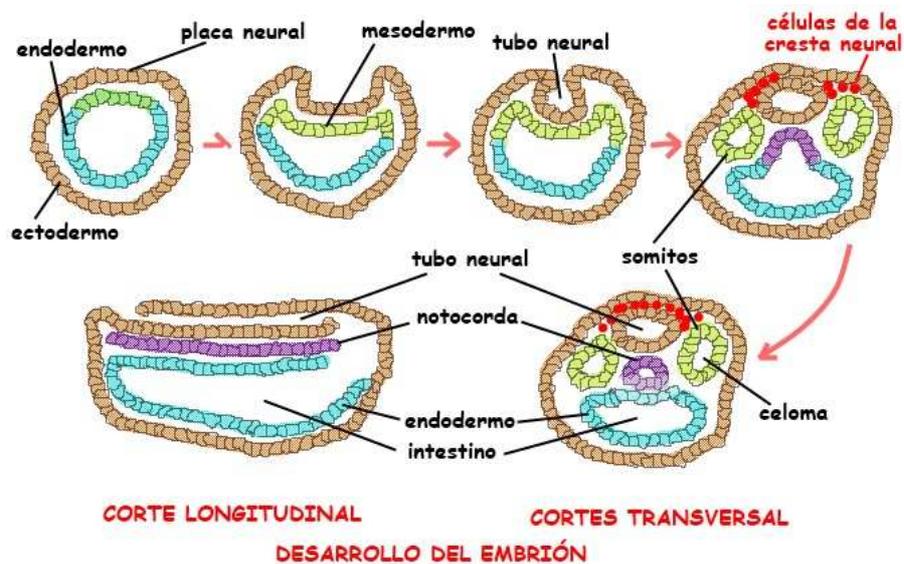
Comenzamos con la aparición de la notocorda, ya que con ella se abrió el complejo y variado mundo de los vertebrados.

La notocorda o cuerda dorsal es un cuerpo flexible con forma de vara que se encuentra en todos los embriones de todos los cordados -entre otros todos los animales vertebrados- y que corre a lo largo de su eje longitudinal. Se compone de células derivadas del mesodermo, de las que definen su eje primitivo de simetría. En los cordados inferiores persiste durante toda la vida como el principal apoyo axial del cuerpo, mientras que en los vertebrados es la columna vertebral la que toma su lugar.

¿Cómo se desarrolla orgánicamente la notocorda?

Todo se inicia durante la fase embrionaria, en el momento ya conocido en que el mesodermo, órgano precursor del esqueleto y del sistema muscular, iba creciendo y emigrando a lo largo de la línea central primitiva, como ya se comentó al hablar de la diferenciación celular (ver el capítulo 22). Durante este proceso el mesodermo va generando unas células nuevas que ocuparán también la posición del eje antero/posterior, y que poco a poco van invaginando y creando un cordón que será la *notocorda*, futuro eje vertebral de sostén del organismo. En el capítulo 19, “*Los filos del Cámbrico*”, ya comentamos su probable procedencia evolutiva a partir de tejido muscular. Mientras, por encima del tejido que generará la notocorda, quizás por el estímulo solar que llega desde el cénit, se produce un engrosamiento longitudinal del ectodermo que va a formar

la *placa neural* en un movimiento progresivo de crecimiento hacia el polo anterior del embrión. Está demostrado que la aparición de las células “nerviosas” de la placa neural se produce como consecuencia de una inducción química llevada a cabo por las células de la notocorda que se encuentra inmediatamente debajo de ella. Esto significa que es el futuro tejido muscular y óseo quien induce la formación de tejido nervioso. Es curioso que el sistema encargado de nuestra motricidad siguiendo las órdenes del sistema nervioso sea el que a nivel embrionario induce y sustenta al propio sistema neuronal. Sin mesodermo no sería posible la formación de un sistema nervioso desarrollado.



El camino del sistema nervioso

Acompañando al desarrollo de la notocorda sobre el mesodermo, en el ectodermo la placa neural hace un movimiento semejante, llevando a cabo una invaginación superior que creará el *tubo neural* precursor del sistema nervioso.

¿Cómo se desarrolla fisiológicamente el sistema nervioso?

Seguir sus pasos durante el desarrollo embrionario nos puede dar una idea de cuales pudieron ser las fases de su avance evolutivo.

Mientras se va formando el tubo neural, las células del ectodermo que se ubican como un límite entre la parte neural y la no-neural se separarán de ésta para constituir una estructura alargada, a cada lado del tubo neural y por debajo del ectodermo: la *cresta neural*. Sus células son multipotentes, es decir, son capaces de especializarse y desarrollar diversas y distintas

funciones. Desde hueso, piel y tendones, hasta neuronas. Una vez más observamos cómo las células del sistema nervioso proceden de tejidos que no tienen nada que ver con la función neuronal.

Tanto de la cresta neural como del tubo neural se formarán las diversas estructuras del sistema nervioso central y periférico. Después de formarse el tubo neural, se suceden en él una serie de transformaciones en su longitud, en su diámetro y en el grosor de sus paredes. Estos cambios no son homogéneos, ya que en diferentes regiones del tubo presentan distinta magnitud, lo que dará pie a la formación diferenciada del sistema nervioso, desde el encéfalo hasta cualquier nervio.

El mesodermo, por su lado y siguiendo el esquema que parece paralelo al del ectodermo, genera unas masas celulares, segmentadas, los *somitos*, al lado de la notocorda, que serán las precursoras de parte del esqueleto y de la musculatura.

Ya está la “semilla” conformada para iniciar el camino de construcción del sistema nervioso desde el tubo neural, del esqueleto y músculos a partir de los somitos y del resto de órganos que modelará el endodermo. Lo que nos da pie ahora para analizar su proceso evolutivo.

Estudios⁽⁴⁰⁾ sobre el anélido *Platynereis dumerilii*, considerado un fósil viviente que apareció hace 600 millones de años, han mostrado que este gusano tiene idéntica maquinaria molecular que la que permite en animales más desarrollados la creación del córtex, la parte más externa y evolutivamente más moderna del encéfalo, que alcanzará su máximo desarrollo en los humanos. Además, este gusano parece que tiene unas proteínas similares a las del actual gusano bellota, *Saccoglossus kowalevskii*, que vive en la arena del fondo marino y que tiene un sistema nervioso muy simple.

Estos últimos animales están muy alejados evolutivamente de los invertebrados (de hecho pertenecen a otro filo, el de los hemicordados) pero tienen unas estructuras branquiales similares a las de los tiburones y anfibios. Todas ellas son características que relacionan al *Platynereis* tanto con los invertebrados con notocorda como con los vertebrados. Se ha investigado en su desarrollo embrionario para ver cómo actúan tres proteínas concretas en la zona de su cuerpo equivalente a lo que sería el cerebro del embrión de los vertebrados, que finalmente en estos dará lugar al encéfalo. Estas investigaciones han demostrado que estas proteínas interaccionan entre ellas de la misma manera que lo hacen en los

vertebrados. En los embriones señalan dónde se debe formar el órgano cerebral. Los vertebrados desarrollarán un cerebro completo, mientras que en el gusano solamente se forma una “piel cerebral”.

Estas similitudes entre animales de hace millones de años, gusanos y vertebrados, no pueden ser una coincidencia e indican que el sistema nervioso probablemente evolucionó tiempo atrás en el antepasado común a todos ellos, hace unos 590 millones de años. Quizás los primeros cerebros datan de los primeros gusanos platelmintos, que puede que los usaran para navegar por los fondos de los mares primordiales en busca de comida.

En efecto, parece ser una opinión generalizada dentro de la neurología que el sistema nervioso, y en particular el encéfalo, sea una respuesta adaptativa de los organismos que necesitan moverse para alimentarse y escapar de los predadores. Las plantas, aunque son seres vivos, no han desarrollado este órgano. Por otro lado es interesante remarcar que la complejidad del sistema nervioso es proporcional a la complejidad en la búsqueda de alimento. En los rumiantes que se alimentan ramoneando tranquilamente la hierba, la corteza cerebral es más simple que la de los carnívoros que necesitan capturar a sus presas tras un acecho, plantear la estrategia de caza y disponer de agilidad de movimientos para conseguirlas.

A este respecto es muy significativo lo que les pasa a los tunicados. En estado larval son animales que se mueven nadando en el agua del mar. Pero cuando les llega el momento de ser adultos se anclan en el fondo permaneciendo estáticos para siempre. Las larvas presentan notocorda y sistema nervioso. En el momento que se fijan al suelo su propio organismo reabsorbe el incipiente sistema nervioso larval ya que no precisa de él. Asombroso.

Y así veremos como cronológicamente a medida que los organismos se complican y sus necesidades motrices son mayores, el sistema nervioso va cogiendo estructura. Observamos que los animales pluricelulares más primitivos no poseen sistema nervioso, aunque sí presentan un rasgo funcional próximo al par estímulo-respuesta. Tienen su cuerpo rodeado por una capa de células epiteliales que son capaces de interactuar con el medio que les rodea: se comportan como órganos excitables que perciben estímulos ambientales.

Por efecto de presiones evolutivas algunas células de ese epitelio ectodérmico comenzaron a desarrollar características funcionales que

podríamos llamar “neuronales”, de forma que fueron capaces de reaccionar de forma especial frente a estímulos externos. Las nuevas aptitudes hicieron que algunas de estas células se modificaran integrando funciones propias de las neuronas, desarrollando habilidades especializadas que les permitían reaccionar con eficiencia frente a los estímulos para después generar un tipo de respuesta rápida que se propagaba a otras células del organismo. Esta destreza primitiva aún la encontramos en animales actuales, desde la medusa hasta embriones de anfibios.

Y quizás esta habilidad explique el hecho mencionado más arriba de que el sistema nervioso de los animales más complejos, al observar su desarrollo embrionario, provenga del mismo tejido ectodérmico que va a desarrollar el epitelio exterior del animal: células sensoriales de la piel se han ido transformado, a lo largo del largo camino de la evolución, en otras más complejas -las neuronas- que han heredado la función primaria.

Demos un paso más que nos lleve a los cnidarios (es decir, medusas y pólipos, hidras y corales). En estos animales aparecen las primeras estructuras celulares a las que podemos llamar propiamente sistemas nerviosos: están organizadas en forma de red y constituyen un sistema nervioso reticular. Las neuronas tienden a acumularse formando pequeños ganglios que se comunican entre sí mediante haces nerviosos. A pesar de ello este tipo de animales aún carecen de coordinación entre las distintas partes de su cuerpo que sólo reaccionan a estímulos locales. Sus nervios todavía no están recubiertos de mielina.



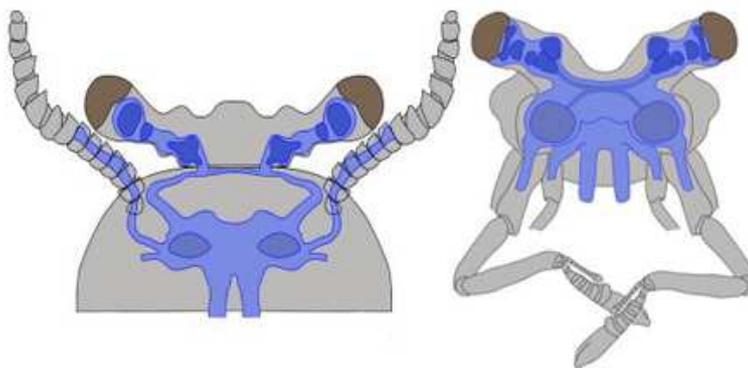
Cronología del desarrollo del sistema nervioso. La datación corresponde al momento en que se independizó la correspondiente especie del árbol filogenético general (Imágenes de wikimedia)

Un nuevo avance. Los erizos y estrellas de mar sí disponen ya de un sistema nervioso autónomo formado por un anillo circular con extensiones hacia sus segmentaciones radiales. Mediante esta estructura neuronal los ganglios quedan perfectamente interrelacionados. Ello permite una

coordinación unificada en todo el cuerpo de la respuesta a los estímulos recibidos.

En el capítulo 18 sobre el Cámbrico habíamos hablado de *Haikouella* una especie de pez sin aletas de hace unos 530 millones de años. Es seguro que dominaba la natación batiendo su cuerpo a un lado y otro gracias a haces de músculos que se apoyaban en una cuerda semirrígida que iba de la cabeza a su cola. Posiblemente debió ser el primer vestigio de una notocorda acompañada de un tubo neural. Seguramente sería un animal segmentado, ya que poseía estructuras orgánicas diferenciadas, como branquias, músculos o corazón.

En estos animales segmentados, que como ya sabemos crecen por metamerización de sus cuerpos, la red neuronal tiene un centro en cada segmento formado por un par de ganglios interconectados entre sí, y que forman además un par de cadenas longitudinales al estar unidos los de un segmento con los de sus adyacentes. En los segmentos más próximos al polo anterior del animal, en donde la evolución va concentrando importantes detectores sensoriales -vista, olfato, gusto, antenas táctiles-, los ganglios se ordenan formando cerebros primitivos lo que les permitía realizar funciones de aprendizaje y de una posterior respuesta variada a los estímulos recibidos. Esta disposición la podemos ver en algunas lombrices y en los artrópodos.



(Fuente de la ilustración: Nicholas Strausfeld, *Nature* ⁽⁴¹⁾ 2012)

En el año 2012 se ha reportado el hallazgo en la provincia china de Yunnan del fósil de un artrópodo del Cámbrico, datado en 520 millones de años, con un diseño corporal muy sencillo, al que se ha denominado *Fuxianhuia protensa*. En este fósil se conservan estructuras correspondientes al cerebro del animal, el cual es tan sofisticado como el de los modernos artrópodos, lo que situaría la aparición de cerebros complejos en una época anterior a la que hasta ahora se había asumido.

En la imagen anterior se ha dibujado una reconstrucción del cerebro de *Fuxianhuia protensa* (a la izquierda), que como se puede observar presenta una similitud con el cerebro complejo del cangrejo ermitaño *Coenobita clypeatus*, un artrópodo moderno (a la derecha).

Avanzado el proceso evolutivo, en los vertebrados los ganglios cerebrales primitivos van a experimentar un gran desarrollo, tomando la dirección de las funciones del sistema nervioso, frente a los otros ganglios más distales. Se trata del proceso de encefalización, por el que se van incrementando las capacidades del órgano director de cualquier organismo animal complejo, resultado de una coevolución entre las habilidades del animal y la creciente capacidad de su masa neuronal. El encéfalo constituye la parte más masiva del sistema nervioso, siendo la relación entre su tamaño y el del cuerpo que lo posee un indicador de la inteligencia de un organismo. En los primeros pasos evolutivos dirigirá las funciones vitales más elementales quedando el vestigio de aquella época en el bulbo raquídeo de los encéfalos modernos más desarrollados. Este estadio cerebral se le conoce como reptiliano. Progresivamente se van a añadir nuevas estructuras neuronales de tipo ganglionar o cortical, con las que se llegará a gestionar al organismo y su relación con el exterior vía las emociones. A este nuevo estadio más desarrollado se le conoce como sistema límbico. Más tarde irá aumentando el tamaño relativo de los hemisferios cerebrales principalmente en la corteza exterior, gracias a una mutación genética que indujo un crecimiento diferenciado -heterócrono- en distintas partes de aquellos. En este proceso un área específica va tomando el control general, que culminará en el desarrollado córtex frontal de los humanos, verdadero centro de control de las capacidades de razonamiento superiores.

Con esto concluimos el breve paseo por el campo evolutivo de los órganos que dirigen nuestra vitalidad, sus funciones metabólicas, la coordinación mecánica, la percepción de nuestro entorno, la base de la experiencia, las reacciones emocionales y, en el caso de los hombres, la capacidad de proyectar el futuro. En el siguiente capítulo analizaremos el camino evolutivo de algunos de los más importantes órganos y aparatos que precisamos para nuestra subsistencia: el sistema óseo y muscular para moverse, depredar y no ser depredado, y los aparatos digestivo, respiratorio y circulatorio necesarios para alimentarse, metabolizar y expulsar los residuos perniciosos generados durante el proceso.

26. Evolución de herramientas de sostén y alimentación

En el último capítulo hemos estado profundizando en el camino evolutivo del sistema nervioso. Hoy continuaremos la saga dando por sabido al ente director y coordinador para centrarnos en algunos de los “trabajadores” de los organismos: nos sujetamos gracias a los huesos y músculos, nos alimentamos mediante el digestivo y con la ayuda del respiratorio y circulatorio. Ésta es su historia.

Pero antes de entrar en materia, recuerdo que en este capítulo, como en los anteriores, no estoy siguiendo estrictamente el devenir cronológico de los acontecimientos, sino que me centro en cómo evolucionaron estos órganos concretos, independientemente de en qué periodo temporal se desarrollaron los hechos.

Evolución del sistema óseo

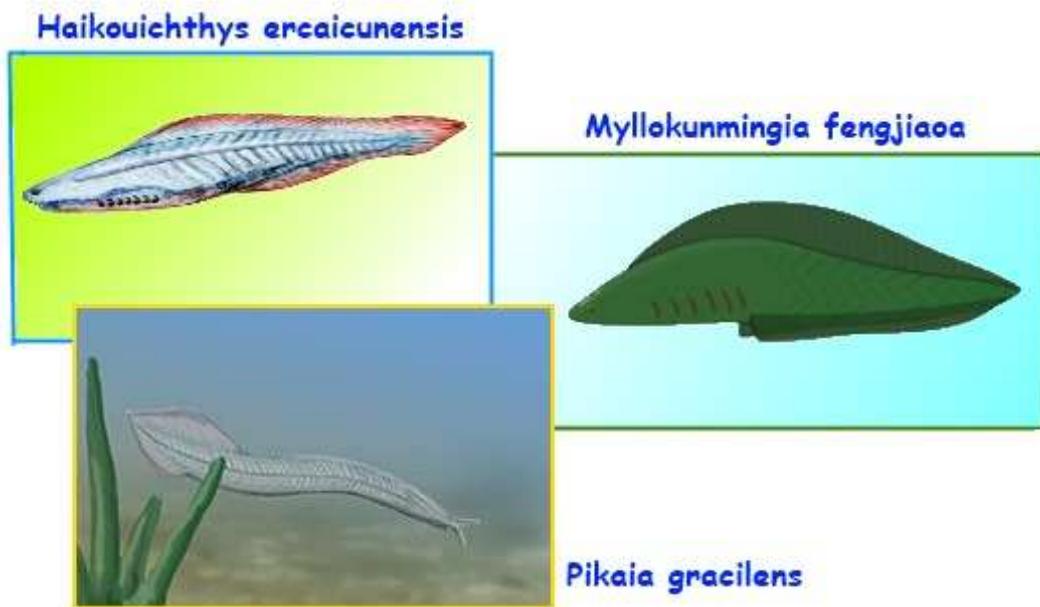
A lo largo de los siguientes párrafos vamos a analizar el sistema óseo propio de los vertebrados, sin hacer mención a otros adminículos de sujeción y soporte pertenecientes a otros animales, como pueden ser las espículas de las esponjas, los caparazones de los artrópodos o los osículos de los equinodermos.

La evolución del sistema óseo transcurre paralela a la aparición y evolución del sistema nervioso o del aparato muscular. Es fácil de entender, ya que es imposible imaginar que hayan evolucionado por separado. Por ejemplo, los pares de ganglios del tronco encefálico relacionados con la vista, el olfato y el oído aparecieron como consecuencia de que añadieron un plus de utilidad y eficacia en la supervivencia, y fueron por tanto preservados por la selección natural. Sin embargo, esta utilidad y eficacia no servirían para nada si no tuvieran un propósito: eran útiles para orientarse y desplazarse por el medio, lo que nos lleva a que debieron coevolucionar con los músculos y estructuras óseas de soporte, una columna vertebral o unas extremidades. Como también sería ilógico pensar que estos ganglios hubieran aparecido independientemente de los correspondientes órganos sensoriales. Y a su vez, no se hubieran podido manifestar a no ser que les hubiera acompañado en su camino un

soporte rígido craneal, con orificios por donde el sistema nervioso pudiera acceder a la información exterior. Fue un proceso evolutivo cooperante, no estrictamente a golpe de “decreto ley”, sino más bien cada uno a su ritmo, siguiendo las pequeñas ventajas que poco a poco iban apareciendo.

Aunque el uso de minerales como elementos de sostén y protección es muy antiguo, posiblemente del Neoproterozoico, es durante el Cámbrico cuando la biomineralización del CO_3Ca se usa como un elemento diferenciador, al emplearse de forma intensa y variada para crear elementos de soporte estructural.

En los fósiles marinos de *Pikaia gracilens*, *Haikouichthys ercaicunensis* y *Mylokunmingia fengjiaoa*, así como en los fósiles de los peces marinos *Pteraspidomorphi* encontramos los ancestros más antiguos de los actuales vertebrados, y por tanto el origen del sistema óseo actual. Algunos de ellos ya son viejos conocidos.

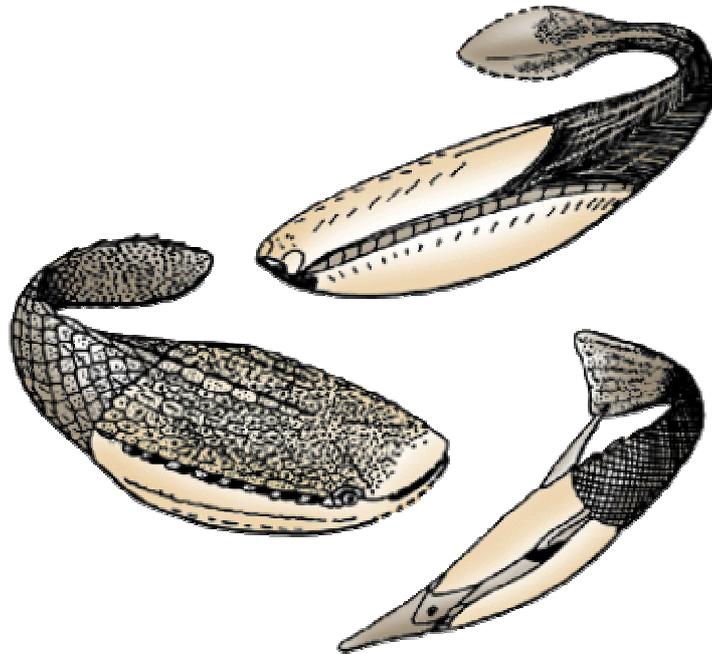


(Wikimedia, CC BY-SA 3.0, dominio público y GNU FDL 1.2)

Haikouichthys ercaicunensis es un vertebrado de hace 530 millones de años, con apariencia de pez, que se caracteriza por poseer una banda ondulante única que recorre longitudinalmente tanto el flanco dorsal como el ventral. La orientación radial de la estructura de la aleta dorsal se asemejaba a la de peces muy primitivos. Esta característica le coloca como uno de los más antiguos cordados. Tenía cabeza y tronco diferenciados. La cabeza tenía entre seis y nueve segmentos regulares, mientras que el tronco estaba compuesto por otro tipo de segmentos en forma de “V”.

Myllokunmingia fengjiao vivió en el bajo Cámbrico, hace unos 525 millones de años. Disponía de seis segmentos craneales diferenciados de los veinticinco, también en forma de “V”, del tronco. Todos los segmentos eran cartilagosos, sin que existan indicios de mineralización de los elementos de su esqueleto. Sobre el tronco aparece una aleta dorsal en forma de vela y por debajo una aleta ventral, posiblemente doble, y sin estructuras parecidas a radios.

Pikaia gracilens (510 millones de años) fue clasificado inicialmente como un gusano poliqueto, por su segmentación regular corporal, aunque en 1979 fue incluido dentro de los cordados, convirtiéndose en uno de los más antiguos ancestros conocidos de los vertebrados modernos, ya que posee una columna vertebral primitiva de composición cartilaginosa, sin vestigios de cráneo y con médula espinal interna.



Ejemplares de pteraspídomorfos (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Desde los anteriores fósiles marinos hasta la aparición de los primeros fósiles de peces sin mandíbulas (pteraspídomorfos) transcurrieron unos 50 millones de años, adentrándonos en el periodo Ordovícico que se inició hace 488 millones de años. Con ellos aparece el primer escudo óseo verdadero, que cubría la cabeza. Tenían una única aleta caudal. Analizando en sus fósiles la cara interior de las placas craneales protectoras, se han observado improntas de las agallas, de un cerebro y de cápsulas nasales.

Más adelante seguiremos la pista de la evolución del esqueleto como estructura, de cartilaginosa a ósea, desde los peces a los mamíferos.

Evolución del sistema muscular

La mayoría de los animales multicelulares poseen unos órganos de tejido contráctil, encargados principalmente del movimiento. Las células que forman el tejido muscular se agrupan en haces distribuidos de diversas maneras por el cuerpo de los animales.

Siguiendo el camino evolutivo de los animales que poseen este tipo de estructuras nos podemos hacer una idea aproximada de la cronología de su evolución, que queda reflejada en la figura de más abajo. Veremos cómo se pasará de una disposición de simple malla contráctil a una progresiva independencia e individualización del tejido muscular y a la colaboración con los tejidos de sostén.

Los animales *diblásticos* (anémonas, medusas...) tienen los haces dispersos bajo el tejido exterior, *a modo de red*, por lo que pueden contraer de este modo la entrada y salida del agua a través del blastóporo -el orificio que les hace de boca y ano-. Las medusas utilizan la salida de agua para impulsar el desplazamiento.



Posible evolución cronológica del sistema muscular. Las fechas corresponden al inicio de la radiación del filo (Imágenes de wikimedia)

En los animales *triblásticos acelomados* (platelmintos, nemátodos, nemértinos y rotíferos) y en los moluscos, los haces musculares forman una capa continua unida al tejido de recubrimiento externo, formando *un saco músculo-cutáneo*. Se mueven por la contracción de este saco, que deforma el cuerpo en diversas direcciones. Los cefalópodos utilizan esta contracción del saco muscular para expulsar agua del cuerpo y, como las medusas, desplazarse por la fuerza de la reacción.

Los animales *triblásticos celomados* con cuerpo segmentado (anélidos, artrópodos y vertebrados) tienen los haces musculares formando *unos órganos que se repiten por cada metámero, son músculos segmentarios*. Los anélidos poseen también sacos musculares además de músculos segmentarios. Se mueven mediante una serie de contracciones y extensiones que le permiten desplazarse arrastrándose por el suelo.

En los artrópodos y vertebrados los músculos segmentarios tienen una forma definida y son independientes unos de otros. Los artrópodos poseen músculos insertos por medio de tendones en la parte interna de las piezas del caparazón externo de quitina. Contrayéndolos, permite que el animal se mueva, pues el caparazón está debidamente articulado. Igualmente ocurre con las patas, con las que realizan los movimientos de traslación.

En los vertebrados también los músculos se insertan por tendones a los huesos del esqueleto. Con su contracción levantan las piezas esqueléticas, permitiendo a las diversas partes del cuerpo moverse. Mediante un juego de músculos antagónicos se consiguen movimientos opuestos sobre una misma articulación: cuando uno de ellos se contrae el otro se relaja. Estos músculos son particularmente importantes en las extremidades que realizan un movimiento activo.

Evolución del sistema circulatorio

El sistema circulatorio es el aparato logístico de los organismos: transporta los nutrientes y oxígeno hasta las células y a los residuos hasta los puntos de eliminación. Al igual que hicimos con el tejido óseo y el muscular, la siguiente relación por orden evolutivo nos da una idea de cómo se fue sofisticando el sistema circulatorio a lo largo del tiempo. Veremos cómo se inicia con unos elementales conductos para la distribución del alimento, para irse complicando con la aparición de un elemento impulsor del líquido que soporta el transporte.

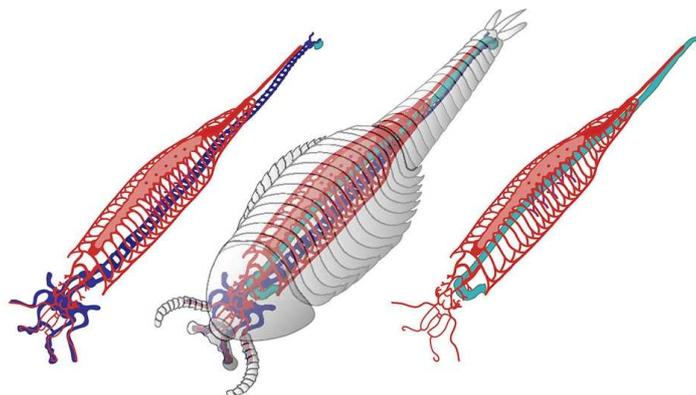
En las *esponjas* y en la mayoría de los *celentéreos* no existe un sistema circulatorio propiamente dicho. La difusión de los nutrientes tiene lugar de una célula a otra sin grandes problemas. Únicamente en algunos de ellos *la cavidad gastrovascular presenta ramificaciones* para facilitar la distribución de los nutrientes a todas las células del organismo, lo que constituye un muy rudimentario sistema circulatorio. Pudo iniciarse en la frontera del Proterozoico-Fanerozoico, en el entorno de los 580 millones de años.



Evolución del sistema circulatorio. La datación corresponde a la fecha estimada de radiación del correspondiente filo (Imágenes de wikimedia)

La mayoría de los invertebrados posee un sistema circulatorio abierto, en el que la hemolinfa -el líquido equivalente a la sangre-, circula a través de un sistema de canales o senos. Muchos invertebrados poseen además estructuras pulsátiles para dirigir la circulación de la hemolinfa.

En algunos grupos, estas estructuras de bombeo no son más que simples vasos con cierta capacidad contráctil, pero también existen otros grupos que poseen órganos más especializados y complejos. Podemos datarlo como una modificación del Cámbrico temprano, hace unos 540 millones de años. De hecho se ha descubierto⁽⁴²⁾ en un yacimiento chino lo que resulta ser el primer indicio fósil de un corazón, con forma tubular y vasos sanguíneos, que corresponde a *Fuxianhuia protensa*, un artrópodo de hace 520 millones de años.



Reconstrucción de Fuxianhuia protensa, de hace 520 millones de años, con el sistema cardiovascular en rojo, el aparato digestivo en verde y el sistema nervioso central en azul (imagen: Xiaoya Ma et al., Nature⁽⁴²⁾, fair use)

Los vertebrados y algunos grupos de invertebrados poseen sistemas circulatorios cerrados con auténticos vasos. Los sistemas circulatorios cerrados presentan siempre un órgano impulsor de sangre bien diferenciado. Los primeros fósiles conocidos de animales vertebrados que tendrían este tipo de sistema circulatorio serían los ostracodermos, en la frontera Cámbrico-Ordovícico, hace 490 millones de años.

En los peces el corazón tiene sólo dos cámaras, consecutivas, una aurícula y un ventrículo, por lo que la sangre arterial y la venosa no circulaban aún separadas. La evolución cardíaca lleva al siguiente modelo con dos aurículas y un ventrículo en los anfibios y reptiles. Finalmente aparece al corazón de cuatro cámaras en aves y mamíferos.

Evolución del aparato respiratorio

Los órganos respiratorios, frontera entre el oxígeno exterior e interior del organismo, no se encuentran en todos los animales. Los animales muy primitivos, al ser relativamente pequeños y con sus células en contacto con el agua -en donde está disuelto el oxígeno- o muy próximas a este medio, obtenían este gas por difusión a través de su tegumento externo y de allí al resto de células, todas muy cercanas. Este tipo de respiración cutánea es la que practican los animales más sencillos y de pequeño tamaño, como las esponjas, medusas, pólipos... Algunos animales también la realizan como complemento de los sistemas respiratorios propiamente dichos.

Hace 525 millones de años, al inicio del Cámbrico, como ya comentamos al hablar del *Myllokunmingia fengjiao* y su notocorda, aparecen ya

animales con arcos branquiales. A partir de ellos se desarrollaron las branquias, órganos especializados en el intercambio de oxígeno, que se constituyeron como la principal opción para una gran mayoría de los animales acuáticos como artrópodos, peces o las larvas de los anfibios.



Evolución de los aparatos respiradores. La datación corresponde a la fecha estimada de radiación del correspondiente filo (Imágenes de Wikimedia)

Con el inicio del asalto de la tierra por parte de los artrópodos marinos, estos tuvieron que cambiar su metodología de respiración desarrollando con el tiempo un sistema tubular traqueal, por el que el aire llegaba directamente hasta cerca de los tejidos internos y difundiendo el oxígeno casi en el mismo lugar que se necesitaba. Fue la solución alcanzada por los *insectos*, *miriápodos* y *quelicerados*, entre otros. Debió suceder hace alrededor de 480 millones de años.

El segundo asalto de la tierra por los animales marinos fue el que realizaron los *tetrápodos*, descendientes directos de los peces. En estos últimos se había empezado a especializar un tipo de saco desarrollado en la parte inferior de su faringe, que poco a poco fue cargándose de vasos sanguíneos y tomando funciones respiratorias. Con la salida a tierra fueron evolucionando paulatinamente hacia verdaderos pulmones. Esto debió iniciarse ya en el Devónico, en cuyo capítulo hablaremos del famoso *Tiktaalik*, medio pez, medio tetrápodo, hace más o menos 380 millones de años.

Evolución del aparato digestivo

El aparato digestivo es la gran caldera de la alquimia, en donde se procesan los alimentos para extraer los nutrientes de tal manera que puedan ser utilizados por las células.

Los primitivos protozoos se alimentaban por fagocitosis o bien absorbiendo los nutrientes a través de sus membranas celulares, para después digerirlos en el propio citoplasma con la ayuda de unos corpúsculos llamados lisosomas. Así debió ser la función digestiva para todos los animales anteriores a los metazoos, que como sabemos eran los animales eucariotas pluricelulares.

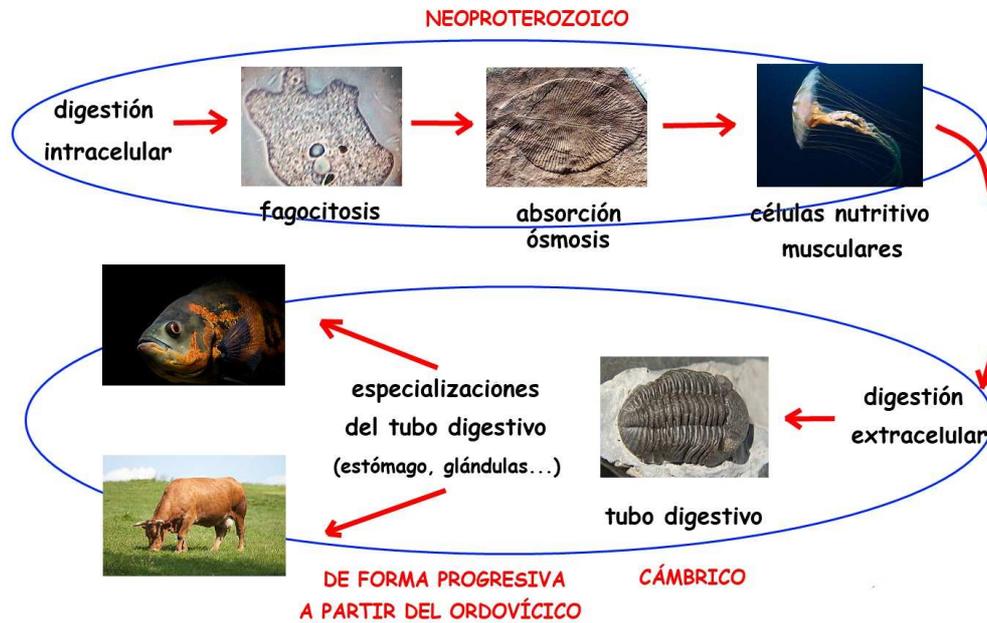
Posiblemente los animales ediacáricos, habitantes del más inicial mundo metazoo, tendrían mecanismos de alimentación semejantes. Sus estructuras planas y la falta de evidencias de boca e intestinos, así como de alguna prueba de su estructura interna, hacen difícil el imaginarlos según los parámetros actuales. La hipótesis más aceptada es que podrían succionar los nutrientes del agua a su alrededor por ósmosis. Se trata de soluciones aplicadas hace 600 millones de años.

Poco antes del Cámbrico y a lo largo de este periodo aparecen nuevas alternativas. Han transcurrido quizás 40 o 50 millones de años desde Ediacara. En las esponjas encontramos una especie de pared gástrica recubierta por un tapiz unicelular de coanocitos. No es que se pueda considerar como un auténtico tubo digestivo, ya que este tipo de células nutritivo-musculares son las encargadas de captar allí los nutrientes por fagocitosis, posterior digestión y transporte al resto de células. Sus compañeros en el tiempo y la evolución, los *celentéreos* -medusas y pólipos- y los *platelmintos*, que practican un sistema semejante, tienen cavidades y tractos digestivos, con una única abertura exterior, en donde se produce una predigestión, encargándose de completar el ciclo las mencionadas células especializadas. El alimento se transporta mediante cilios, se absorbe en las paredes internas y la *digestión es intracelular*. Los residuos son expulsados por el mismo orificio.

A medida que aumentaba la complejidad de los animales la digestión intracelular iba siendo desplazada por la *digestión extracelular*, aunque en algunos metazoos aún no aparece un tubo digestivo específico.

En la *mayoría de los invertebrados* el *tubo digestivo* ya tiene por lo general boca y ano, recubierto de un epitelio en el que se distinguen células secretoras y absorbentes, con funciones diferenciadas según el tramo y según los filos: la parte anterior es en la que se localizan los órganos masticadores, una parte intermedia de variada morfología, aunque aún no muy diferenciada de un ensanchamiento intestinal, en donde tiene lugar la digestión, y un intestino posterior en donde se realiza la absorción de los

nutrientes. Todo esto sucedía durante el Cámbrico, en el entorno de hace 540 a 490 millones de años.



Evolución del aparato digestivo (Imágenes de Wikimedia)

En los vertebrados los criterios de diseño no varían demasiado, ya que también se puede diferenciar un tubo digestivo anterior, con un *estómago* ya muy desarrollado, y otro posterior donde se absorben los nutrientes. A lo largo de ambos aparecen nuevas *glándulas*, como las salivares, hígado o páncreas. Según la clase taxonómica aparecen adminículos particulares: las branquias en los peces, la cloaca en los anfibios, la molleja en las aves o el especial aparejo estomacal de los mamíferos rumiantes. Las anteriores modificaciones se produjeron a lo largo de la historia evolutiva de los últimos 450 millones de años.

Hecho ya un rápido repaso sobre la evolución de los principales aparatos y sistemas de los metazoos, dedicaremos un nuevo capítulo, y con ello acabaremos este monográfico específico, a describir la evolución de uno de los órganos principales y más estudiados por su importancia evolutiva: el sensor óptico, el ojo, que conecta a los animales con su exterior.

27. Evolución del ojo

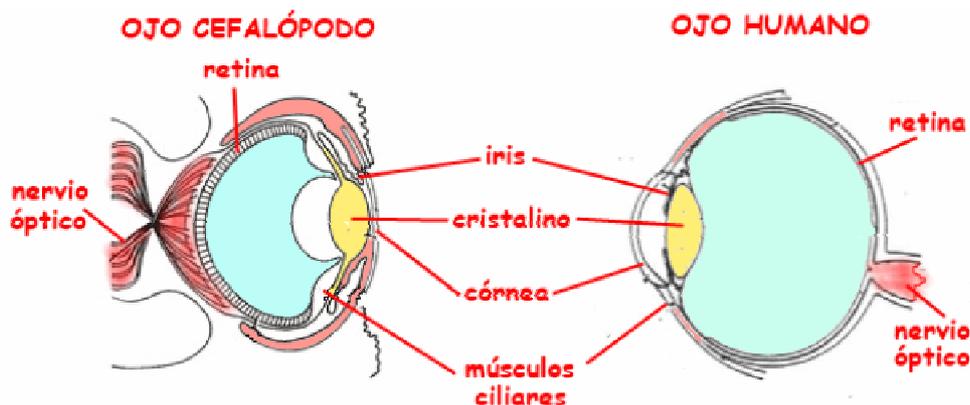
Con este capítulo finalizamos el breve conjunto de tres en los que hemos desarrollado un tema específico: la evolución de los principales sistemas, órganos y aparatos que utilizan los seres del Reino Animalia para su supervivencia.

Continuaremos ahora despiezando un trascendental órgano cuya evolución ha suscitado mucha curiosidad y ha generado infinidad de palabras: el ojo. Antes de seguir leyendo te puede resultar interesante el repasar los estudios teóricos de los biólogos suecos D. E. Nilsson y S. Pelger sobre la evolución de un ojo que ya explicamos en el capítulo 21 en el que hablábamos sobre “La posibilidad real del cambio”.

Evolución del ojo

Desde nuestra perspectiva de *Homo sapiens* es fácil imaginar que la capacidad de reaccionar frente a estímulos luminosos ha tenido que ser, obligatoriamente, una habilidad favorecida por la selección natural. Tanto es así que se cree que el ojo o un mecanismo similar se inventó en la naturaleza unas sesenta veces, todas ellas de forma independiente. Los organismos que hubiesen adquirido aquella sensibilidad podían orientarse, nadar hacia la superficie para conseguir alimento y energía, u ocultarse cuando se intuía una sombra amenazadora, por lo que se salvaba de ser predado.

¿Cómo se pudo desarrollar la capacidad de percibir la luz? Por un lado, observamos que en la naturaleza hay animales de especies muy remotamente relacionadas que tienen ojos muy parecidos, como pueden ser los cefalópodos y los mamíferos. Por otro lado, también es evidente que hay muchas alternativas diferentes, tantas como necesidades: desde una célula fotosensible hasta un complejo ojo semejante a una cámara fotográfica. Se podría pensar que el azar evolutivo ha debido ser actor principal en este reparto. Y siendo esto así, hay evidencias muy consistentes de que, aún manteniendo la diversidad, todo tuvo un primitivo comienzo común. Idénticos genes son los responsables en todos los animales que ven.



Similitud entre el ojo humano y el del cefalópodo. La gran diferencia es el orden de situación del nervio óptico y la retina. En el humano el nervio va por delante y en el cefalópodo por detrás. Un ejemplo más de evolución convergente.

Dejando volar un poco la imaginación nos adentramos aún en estas zonas tan profundas en el tiempo. Podemos percibir una gran semejanza entre las células fotorreceptoras de los ojos y las células fotosensibles con las que las plantas realizan su fotosíntesis. En ambos casos un fotón incide sobre una particular molécula excitándola energéticamente, de forma que la deja en una situación inestable. Como no podía ser menos, pues es lo que normalmente le pasa a cualquier molécula que la han arrancado de su nivel más bajo de energía, se desexcita espontáneamente emitiendo un cuanto de energía. En la planta se transforma en un hueco por donde se cuele el primer electrón de la cadena de transporte, como ya vimos en el capítulo 7, mientras que en los animales inicia la señal química desencadenante de una señal nerviosa. La base del invento no es muy sofisticada; cosa muy distinta es lo que se consiguió hacer más tarde con estos sencillos inicios.

El hecho de ver es una combinación de sensibilidad y definición, entre percibir la luz por un lado, y por otro saber exactamente qué es lo que se tiene delante. Lo primero lo consiguen las células fotorreceptoras, y lo segundo la estructura física del órgano de la vista, su mayor o menor evolución hacia una cámara con lente. Cada animal con percepción luminosa ha llegado hasta la combinación más conveniente para él. En el fondo del mar, donde llega tan poca luz solar, es preferible tener agudizada la sensibilidad y no perder ni un solo fotón, prescindiendo a cambio de cualquier estructura de enfoque de imagen que tape su camino. Y donde hay mucha luz se puede sacrificar eficacia lumínica a cambio de una mayor definición de imagen. El saber simplemente que algo pasa puede ser tan importante como el saber qué es exactamente lo que se acerca. Es el

balance entre una retina desnuda y una retina con lentes y cámaras que enfoquen.

En la base de la sensibilidad se encuentran unas proteínas de la familia de las opsinas. En el ojo humano se encuentran en las células de la retina llamadas conos mientras que en las células *bastones* se encuentran las rodopsinas, cada una de estas proteínas con su ligera variante de estructura molecular. Tienen la propiedad de discriminar la luz según longitudes de onda, por lo que combinando diversos tipos de ellas se percibe un cromatismo. Los humanos discriminamos tres colores (rojo, verde y azul) en las células cono (y el blanco-negro en los bastones), pero hay animales que sólo trabajan con dos colores básicos y los hay que lo hacen hasta con cuatro. La diferencia se ha debido a duplicaciones de los genes que expresan estas proteínas, como son los Pax6, comunes en todos los animales y plantas con capacidad fotorreceptora.

Se han hecho múltiples estudios siguiendo la pista a opsinas y rodopsinas. En cuanto a las últimas se sabe que las hay de dos tipos, a las que para diferenciar llamaremos de tipos A y B. Las dos se encuentran tanto en los vertebrados como en los invertebrados. Curiosamente, los vertebrados utilizan las del tipo A *para ver* mientras que los invertebrados lo hacen con las del tipo B. Pero los vertebrados utilizan las del tipo B como base *para fijar las pautas temporales biológicas*, el reloj circadiano, mientras que los invertebrados utilizan para ello la otra rodopsina. Hay que reconocer que no es sorprendente que una misma proteína desarrolle ambas funciones en principio tan distintas, ya que para ello las dos tienen que tener una habilidad común, y es que deben ser sensibles a la luz. Parece como que ambas rodopsinas existían ya en un antiguo ancestro común con células fotorreceptoras, y que con el paso del tiempo adoptaron distintas especializaciones. Y esto debió suceder hace más de 590 millones de años, que es el momento en el que se cree que se separaron vertebrados e invertebrados. Pero aún hay más.

En las membranas de los cloroplastos de las células vegetales se encuentran un tipo de opsinas que son muy semejantes a las de los vertebrados y a las de los invertebrados, como una mezcla de ambas. Como así sucede también con los genes que las expresan. Son estas opsinas las que orientan a las algas para optimizar su posición ante la luz y así poder maximizar su función clorofílica. El salto hacia atrás es tremendo, ya que implica un ancestral nexo de unión entre plantas y animales hace más de 1.100 millones de años. Pero incluso puede haber más.

Ya se ha comentado que los cloroplastos eran antiguas cianobacterias que entraron en simbiosis con protozoos de mayor tamaño. La evolución de esta sociedad les llevó hasta las plantas. Pero bien, pudo pasar que el protozoo hospedante fuera un animal tipo ameba y que no hubiera simbiosis sino un mero acto nutricional. De la digestión de la cianobacteria quedaron sus rodopsinas, que luego se aprovecharon usándolas para lo que sirven: la percepción de la luz. La ameba consiguió así una especie de rudimentario GPS. Hoy en día es normal que algunos moluscos, por ejemplo, coman algas para aprovechar su capacidad fotosintética formando una especie de quimera. Esta hipótesis nos llevaría en la historia del “ojo” hasta un ancestro mucho más allá, en las profundidades de la vida de la Tierra.

Olvidémonos de los organismos primitivos con sensibilidad lumínica, olvidémonos de las plantas fotosintetizadoras e intentemos analizar el camino de la evolución del ojo de los animales, en los que se desarrolló un sentido de orientación gracias a la capacidad fotosensible de algunas de sus células. Esta sencilla distinción entre luz y oscuridad fue el primer paso.



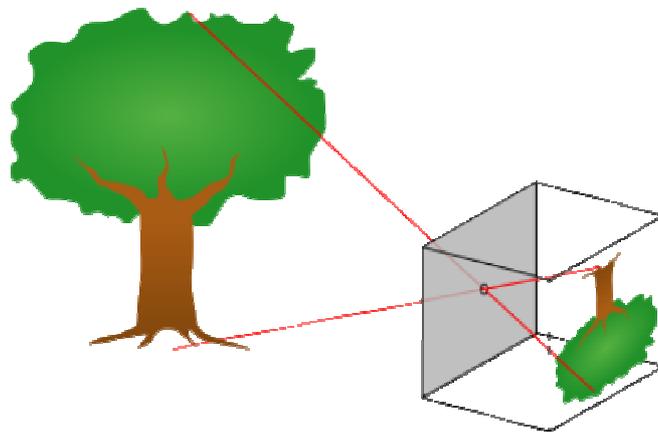
Euglena (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

El inicio pudo ser algo semejante a lo que vemos en el actual *Euglena* -de *eu*, verdadero y *glena*, ojo- un protista fotosintético que tiene un **organelo sensible a la luz** en un extremo de la célula. Se trata de un pequeño estigma que esta formado por proteínas receptoras del tipo rodopsina, que permiten a la célula situarse en una zona con la cantidad optima de luz para realizar la fotosíntesis, acercándose por fototaxis o alejándose por fotofobia al activarse un flagelo que induce el movimiento. Este primitivo “ojo” es solamente sensible a la luminosidad, siendo capaz de determinar si hay luz

o no, aunque no puede discernir forma alguna ni mucho menos formar imágenes.

El siguiente paso involucraría a un animal pluricelular que ya habría desarrollado una *capa de células* sensibles a la luz. Esto lo podemos encontrar en las lombrices de tierra actuales y en anélidos acuáticos, los cuales presentan una capa ordenada de células fotosensibles.

Los nuevos pasos en la evolución del ojo se fueron dando siguiendo la estrategia de captar una mayor cantidad de luz incrementando la superficie sensible. Podemos imaginarlo de la siguiente manera: si tenemos una lámina de células sensibles a la luminosidad e invaginamos dicha lámina en forma de “U” formando una figura cóncava que podríamos denominar “*ojo en copa*”, obtendríamos una disposición espacial en donde cabe un mayor número de células fotorreceptoras. Dependiendo del lugar del donde provenga la luz se iluminarán diferentes partes de la superficie del “ojo en copa”. Esto quiere decir que se podría así detectar de qué dirección proviene la luminosidad. Para los animales con ojos en copa, como los gusanos planos, esto representa una gran ventaja evolutiva, ya que les permite determinar la ubicación de presas o depredadores dependiendo de la fuente de luminosidad y las sombras. El molusco gasterópodo *Patella* - la lapa- dispone de una estructura así.



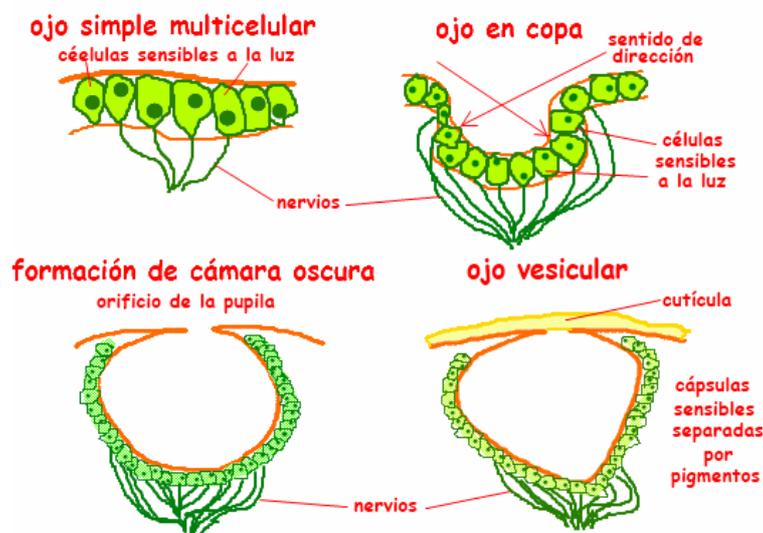
Cámara estenopeica (Wikimedia, dominio público)

En el gasterópodo *Pleurotomaria* encontramos una estructura invaginada mucho más profunda, y en género *Halliotis* encontramos un ojo casi cerrado. El proceso de invaginación de la lámina fotorreceptora llega hasta un punto en que solamente queda un agujero en la parte superior, lo que produce un ojo con un mecanismo similar al de una cámara estenopeica.

Esta clase de ojo proporciona una visión borrosa y poco detallada, pero permite determinar algunas formas simples. El *Nautilus*, un género de moluscos cefalópodos, cuenta con ojos simples de este tipo con los que obtienen una fantástica visión borrosa del entorno. Un gran avance.

La clave para obtener una imagen más clara y que provea una buena visión se encuentra en la *lente*, la cual es la encargada de refractar la luz de manera tal que la imagen se capte con una gran nitidez.

Continuando en los tiempos cámbricos, sabemos que vamos a encontrarnos con los cnidarios, medusas o pólipos. En algunos de sus actuales tataranietos se pueden localizar ojos en copa con lentes rudimentarias que provienen de la epidermis. Quizás los ancestros también los tenían. Sin embargo, los primeros ojos en donde se han podido observar lentes son los de los fósiles de los trilobites tempranos, hace unos 540 millones de años. Sus lentes no eran orgánicas, como pueden ser las de los ojos de los vertebrados, sino cristales de carbonato cálcico. El cristal de carbonato cálcico presenta una estructura en forma de rombo con un eje principal prácticamente transparente a la luz. También las estrellas de mar del tipo ofiuroideo disponen en sus brazos unos orgánulos semejantes a los ojos con lentes de calcita. Al estudiar su desarrollo se ha visto que una particular proteína hace de catalizador inicial en el crecimiento de los cristales de carbonato cálcico. Lo mismo le pasa a los ojos de las actuales cochinillas de mar repartidos por la superficie de su exoesqueleto, con unas lentes de aragonito, otra forma cristalina del carbonato cálcico, que es capaz de enfocar adelantando o retrasando su posición. Bien pudo suceder algo parecido hace 540 millones de años con los trilobites.



Evolución del ojo

Más tarde se debió desarrollar paulatinamente en algunos organismos una capa de líquido de textura gelatinosa que hizo las veces de lente más transparente, y que permitió enfocar los objetos mejorando notablemente la visión de los animales. En los humanos esta capa está compuesta por unas membranas rellenas de una proteína llamada cristalina. El *Anfioxus*, que ya conocimos al hablar del Cámbrico y cuyos ancestros datan de hace unos 560 millones de años, dispone de un sistema visual que se postula como un puente entre los ojos de vertebrados y los de invertebrados.

Y no podemos abandonar este tema sin dejar de hablar de los **ojos compuestos**. Se presentan como una solución al problema de captar la máxima cantidad de luz, en este caso abriendo múltiples vías de entrada. Esta solución la han adoptado ciertos artrópodos, como insectos y crustáceos, y ya se conocía en fósiles del Cámbrico, algunos de los cuales tenían más de 3.000 lentes. Consiste en la agrupación de entre 12 y varios miles de unidades receptoras llamadas omatidios. Los omatidios son unidades sensoriales muy simples formadas por células capaces de distinguir entre la presencia y la falta de luz y en algunos casos capaces de diferenciar los colores. La imagen que percibe un artrópodo es el conjunto de señales de los múltiples omatidios, como una imagen pixelada, orientados en direcciones diferentes, lo que le permite detectar movimientos muy rápidos. Contrariamente a otros tipos de ojos, no tiene una lente central, lo cual implica una baja resolución de imagen.



Ojo compuesto de un insecto (Wikimedia, GNU FDL 1.2) y efecto pixelado de la imagen conseguida según el número de omatidios

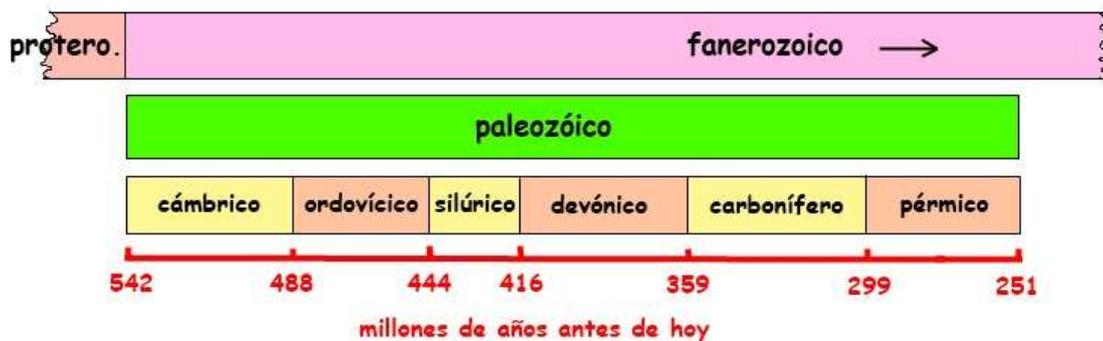
En resumen, una ruta impresionante en la que el medio ambiente y la selección natural, e incluso la simbiogénesis, habrían apacentado el proceso dando los impulsos necesarios como para perfeccionar la habilidad obtenida a partir de unos pigmentos fotorreceptores, hasta hacerla llegar a la complejidad de los ojos de los mamíferos superiores o de los cefalópodos.

A partir del próximo capítulo daremos un cambio significativo y volveremos al devenir cronológico, despidiéndonos del Cámbrico para entrar en el periodo Ordovícico.

28. El Ordovícico

En los últimos capítulos nos habíamos desviado del relato biográfico que estamos intentando hacer. Desde aquel en que compartimos mesa y mantel con la biota del Cámbrico, el 18, impresionados por su repentina exuberancia, solamente nos hemos dedicado a estudiar sus avances en habilidades y morfologías.

Hoy seguimos con el relato retomando su orden cronológico. Vamos a adentrarnos en un nuevo periodo: el Ordovícico. Aunque antes permitidme que tenga una licencia con vosotros, sufridos lectores, ya que comenzaré con una breve historia imaginada que espero nos sirva de enlace y recuerdo de aquel momento cámbrico que se perdió hace ya diez entradas.

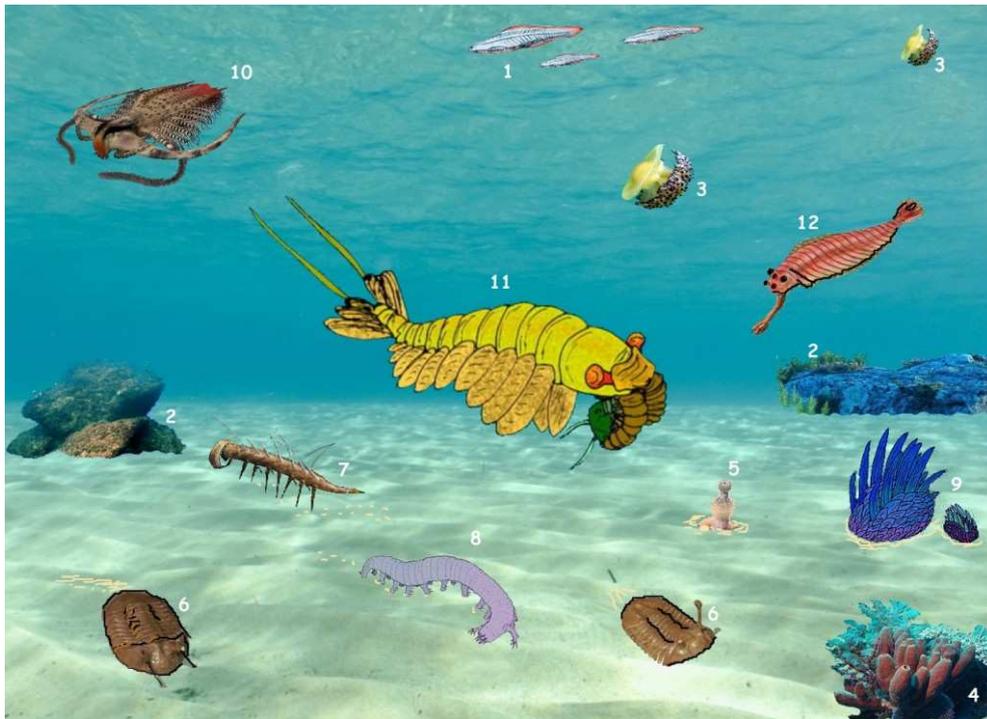


Un novelesco recuerdo al Cámbrico

El día iba declinando tranquilo. La tarde, templada y agradable. Costaba respirar un poco, ya que el nivel de oxígeno era un 30% inferior al actual, pero la atmósfera era clara. Las últimas nubes desaparecían detrás de las nuevas montañas, sinfonía de ocre y grises. Áridas y desnudas, rocosas y polvorientas, arañadas por las escorrentías del agua de las lluvias pasadas. Los torrentes saltaban rápidos y las corrientes sólo se frenaban una vez llegadas a las llanuras sedimentarias. Aquel día no soplaba el viento que lija las tierras desnudas y arremolina el polvo. Se podía oír el crepitar lejano de un volcán. Nada se movía, a excepción del agua del río próximo, remansado de vez en cuando como queriendo competir con las charcas de la lluvia. Su verde fondo daba una alegría a las tonalidades ocre y grises

del paisaje. Salpicando los bordes de las charcas, unas manchas marrones, limosas y aterciopeladas, formaban unos tapetes húmedos, colonias bacterianas de las que se alimenta algún lobopodio solitario bajo el agua.

La vista se dirige ahora hacia una playa cercana en donde las olas rompían mansamente, como correspondía a la calma tras la tempestad de primeras horas de la tarde, removiendo las arenas entre las que se veían infinidad de restos de conchas y caparazones, o así lo parecían. A pesar de los arrastres del río cercano, las aguas permanecían tan claras que nos pareció ver en ellas un enjambre que se movía rápidamente, reflejos diminutos y brillantes que contrastaban con la quietud de tierra firme. La atención se desvía hacia estos destellos. El enjambre se acercó curioso: se trataba de un pequeño banco de *Haikouichthys* (1, ver imagen siguiente) que estaba dando cuenta de algún resto orgánico que las olas habían aproximado a la orilla.



Panteón zoológico del Cámbrico (ilusión artística tras recorta y pega del autor, imágenes de Wikimedia) Podemos curiosear la numeración en el texto que acompaña.

Bajo ellos, como podemos imaginar al contemplar la imagen anterior, el panorama cambia drásticamente. Lo que afuera no dejaba de ser más que un solitario mundo pétreo y vacío, bajo la protección del agua la escena estaba repleta de un tremendo bullicio vital. Grandes colonias de algas (2),

tapetes aferrados a las rocas, escondían pequeñas larvas de los animales que poblaban aquel mundo. Por encima, las medusas (3) se dejaban llevar. Tranquilas esponjas (4) abrían su tremenda boca superior expulsando el agua que habían filtrado, ancladas sobre un arrecife que quizás fuera de coral. Semienterrados en la arena asomaban las redondeadas cabezas de los priapúlidos (5). Un mundo idílico en apariencia, ligeramente alterado por algunos trilobites (6) silenciosos y veloces así como por otros artrópodos como la *Hallucigenia* (7), esa especie de palo con pinchos que camina hacia las rocas.

En primer plano podemos observar a un alargado lobopodio *Aysheaia* (8) que parece dirigirse diligentemente a su hábitat natural de las formaciones de esponjas, en donde encontraba comida y protección, mientras a la derecha de la imagen, un par de acorazadas *Wiwaxias* (9) pasean apaciblemente sobre el fondo marino.

De repente la escena parece alterarse. Una *Marella splendens* (10) huye despavorida por el ángulo superior izquierdo de la imagen. Alguna amenaza se cierne sobre la comunidad marina. Efectivamente, un monstruo gigantesco planea entre dos aguas en busca de su presa. El *Anomalocaris* (11) fija sus ojos sobre un trilobites que intenta ocultarse miméticamente en el fondo arenoso, pero no lo consigue. El depredador le ha visto y le parece buena presa. La primera acometida voltea al trilobites que se cierra como una bola. Pero da igual, las mandíbulas potentes de su enemigo consiguen abrir un camino hacia sus partes blandas y succulentas. Mientras, una *Opabinia* (12) observa con sus múltiples ojos negros a la espera de dar buena cuenta de los restos del banquete. La escena dura unos minutos, tras los cuales el *Anomalocaris* se aleja silencioso y ondulante.

Fuera, el sol se estaba ocultando y en la inmensidad del espacio comenzaban a lucir las estrellas. Aquella noche la explosión del Cámbrico pensó ¡buen trabajo! Ahora a seguir caminando. Iba a ser la antesala del Ordovícico.

Bienvenido al Ordovícico. De hace 488 hasta hace 444 millones de años.

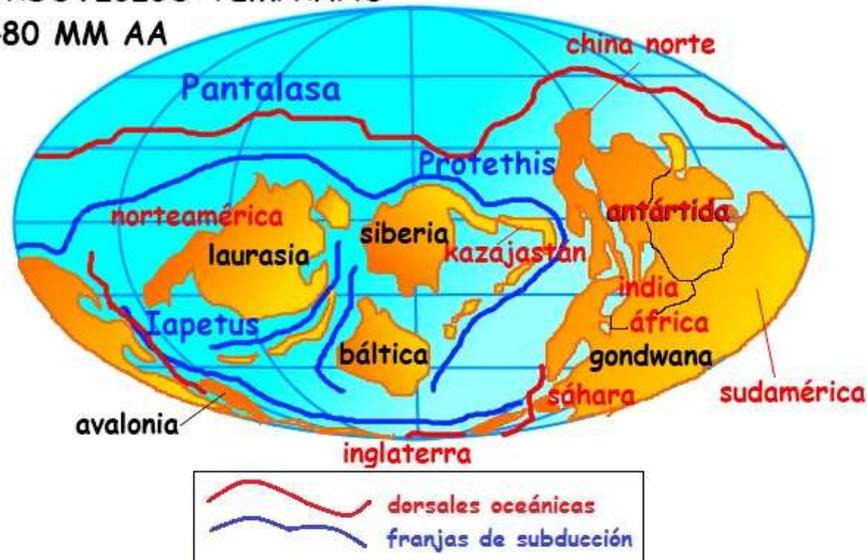
Su nombre proviene del de la tribu celta de los ordovicos. Continúa la explosión del Cámbrico. La vida sigue en el agua y se va a iniciar la excursión de los vegetales sobre la tierra.

Los continentes siguen la deriva balanceándose en el sentido de las agujas del reloj. Gondwana era el mayor y ocupaba un espacio entre el polo sur y

el ecuador, moviéndose hacia una posición austral. Sobre él, ocupando sitio entre los dos trópicos, los continentes de Laurasia y Siberia, los más boreales, y Báltica y Avalonia, los más australes. Entre ellos, el océano Iapetus que se iba estrechando por la deriva de placas, aproximando Báltica y Avalonia a Laurasia, lo que mucho más tarde, en el Silúrico, conformarían el movimiento orogénico Caledoniano.

ORDOVÍCICO TEMPRANO

480 MM AA



Los mares tenían un nivel muy elevado, de forma que habían entrado en tierra firme, por lo que abundaban las aguas someras. Por el contrario, no eran muchas las tierras emergidas, lo que hacía que las rocas de esta época generalmente no eran el resultado acumulativo de la erosión de los continentes, sino que en su mayoría eran rocas sedimentarias de procedencia inorgánica, sedimentos marinos de carbonato cálcico-magnésico que formaron capas de calizas al precipitar los carbonatos disueltos que provenían de la meteorización de las rocas. Esta abundancia de carbonato cálcico se notó también en el tipo de conchas y protecciones externas de la fauna.

Dada la posición de los continentes, el clima era en su mayoría cálido y tropical (incluso en lo que más tarde sería la Antártida), menos en el Ordovícico tardío, cuando Gondwana ocupó posiciones cercanas al polo sur y, por diversas circunstancias que luego comentaremos, se afrontó un periodo glacial.

En aquel momento, hace 460 millones de años, la concentración de CO_2 en la atmósfera era entre 14 y 22 veces los actuales niveles, y el Sol era menos luminoso de lo que es ahora.

La biosfera

La fauna que venía del agitado y vital Cámbrico seguía en el mar. Se vio favorecida por las condiciones climáticas y marinas y continuó floreciendo en el Ordovícico. En las futuras Norteamérica -de la que entonces sólo emergía Canadá- y Europa, el Ordovícico fue un tiempo de mares someros continentales ricos en vida. Por el contrario, la tierra era zona inhóspita, árida y sin posible alimento. En este escenario se comenzaba ya la *colonización por parte de las plantas*, paso inicial para el asalto posterior de los animales.

Los ecosistemas marinos no eran muy diferentes de los actuales. La escalada armamentística entre predados y predadores que se había iniciado en el Cámbrico se consolida ahora. La abundancia de carbonatos en los mares permitió un *incremento del desarrollo de esqueletos biomineralizados* y de otros adminículos, como placas o espículas, que suponemos prevalecieron por su utilidad para la defensa. Como consecuencia de ello se observa en esta época un incremento de trazas erosivas producidas por los animales, que se conoce como la *revolución bioerosiva* del Ordovícico.

Y éste sería el catálogo general de los individuos que se movían por el escenario: Un mundo planctónico de algas y larvas sobrenadaba en la superficie de las aguas, favorecido por las buenas temperaturas y las grandes extensiones de aguas poco profundas. En los fondos marinos abundaban los animales invertebrados, equinodermos, esponjas, hidozoos, briozoos, que continuaban con sus estrategias alimentarias de ramoneo al azar, según decidían las corrientes. Mientras, los moluscos y artrópodos iban imponiéndose en los océanos. Por su lado, los peces, primeros vertebrados de la Tierra, continuaron con su evolución iniciada en el Cámbrico.



Fósil de graptolite Didymograptus murchisoni (Wikimedia, CC BY 2.0)

Los *graptolites* (“*escrito en piedra*”) son fósiles de unos animales coloniales que vivían en soportes de colágeno. Se parecían a gusanos hemicordados y eran muy abundantes. Solían permanecer anclados en el fondo marino, aunque algunos vivían inmersos en la sopa del plancton, entre el cual flotaban a la deriva. Su variedad morfológica con los años y su persistencia en el tiempo fueron grandes, de tal manera que su análisis permite hoy en día determinar la edad del estrato en donde se encontró el fósil.

Los *corales* solitarios se remontan por lo menos al Cámbrico, pero es en el Ordovícico cuando empiezan a formarse los arrecifes coralinos, con diversas morfologías -tubulares, abanicos, túmulos...- sobre los que se asentaban algas y constituían un buen refugio donde proliferaba el resto de la fauna marina.

Al igual que los primeros arrecifes de coral, los *briozoos* (“*animal musgo*”) aparecieron durante el Ordovícico. Son animales semejantes a los braquiópodos ya que disponen de una corona de pequeños tentáculos junto a la boca y viven en un tubo calcáreo o quitinoso anclado al fondo marino.



Briozoo actual de agua dulce (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Los *braquiópodos* (“*corto pie*”) parece ser que derivaban de gusanos que vivían protegidos enterrados en las arenas y limos, asomando sólo la cabeza junto a la que se encontraba una corona de tentáculos que facilitaba la alimentación. La evolución les llevó a desarrollar un par de valvas, una superior y otra inferior, unidas en su región posterior, junto al extremo de la boca. Sus perforaciones son muy abundantes entre los restos fósiles.



Morfología de un braquiópodo, que nos recuerda la solución vital de un animal filogenéticamente muy distinto, un artrópodo como el percebe.

Entre los **artrópodos** destacaban los trilobites y los escorpiones de mar.

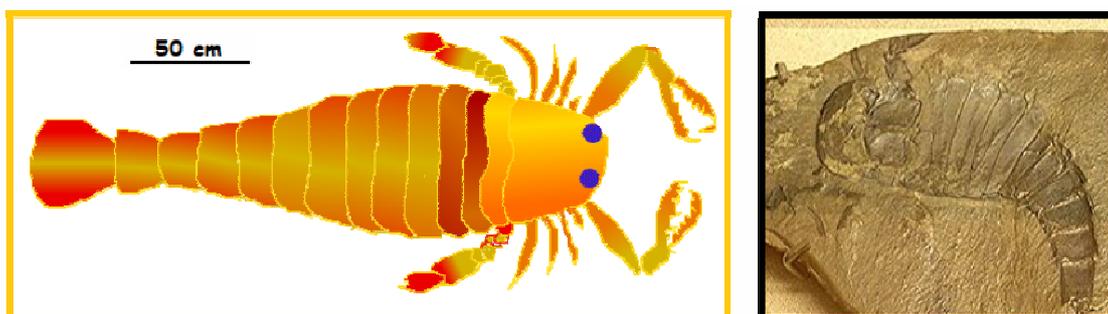
Los trilobites (“tres lóbulos”) eran unos animales segmentados que presentaban una cabeza “acorazada” con unos ojos compuestos sorprendentemente evolucionados, análogos a los de parientes actuales como los crustáceos e insectos. Se cree que por lo general habitaban en aguas poco profundas, filtrando el barro del fondo en que vivían para obtener el alimento. Ante una amenaza se doblaban formando una bola.



Fósil del trilobites Dalmanitina proaeva y un ojo fosilizado de estos artrópodos (Wikimedia, dominio público, y litos.net)

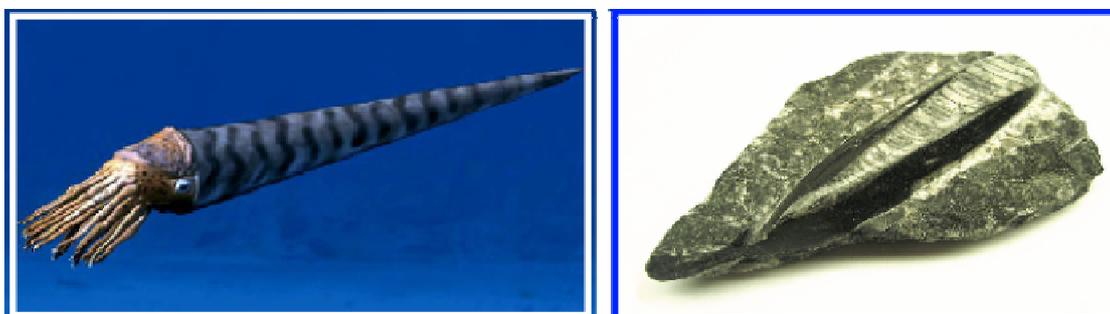
Durante este periodo apareció otro artrópodo, el *Eurypteridus* (“ala ancha”) mal llamado escorpión de mar, que destacaba por haber alcanzado los mayores tamaños entre los de su clase (llegó hasta los 2,5 metros). Tenía un par de apéndices con pinzas -aunque a diferencia de los escorpiones actuales eran como una base con púas-, la cola parecía un tenedor plano para remar en el agua y no poseía un aguijón a diferencia de los escorpiones terrestres actuales. Tenía dos ojos compuestos y en la boca poseía un par de quelíceros parecidos a las tenazas, también con púas. De

aspecto muy amenazador, eran unos predadores que se alimentaban de trilobites y pequeños peces, pero a su vez eran apresados por los ortoconos.



Reproducción artística del escorpión marino Jaekelopterus rhenaniae y fósil del euríptero Megarachne (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Los ***moluscos*** que habían aparecido durante el Cámbrico o incluso ya en el Ediacárico, se convirtieron en comunes y variados, especialmente los *bivalvos* -dos valvas laterales generalmente simétricas-, los *gasterópodos* y los *cefalópodos nautiloideos*. Entre estos últimos, los ortoconos (“*cuerno recto*”), que fueron unos moluscos de gran tamaño, tanto como un autobús, similares a un calamar gigante pero que presentaba una concha en forma de un largo y esbelto cono con la que protegía a todo su cuerpo.

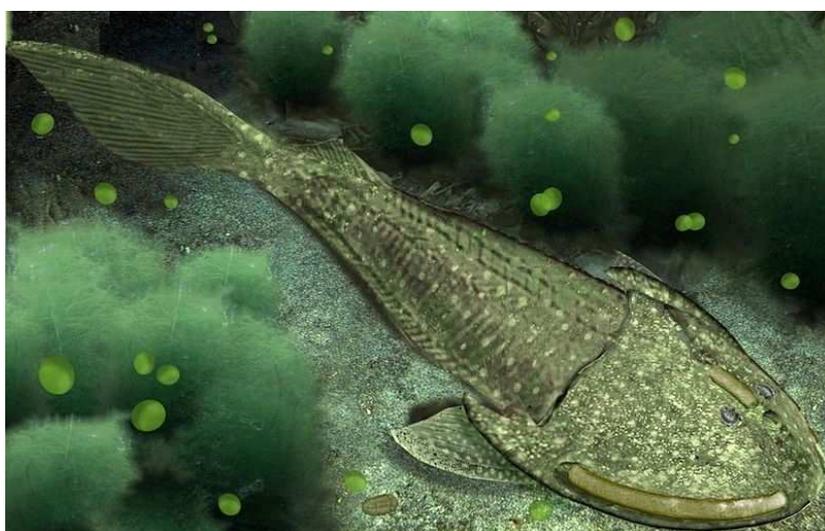


Representación artística y fósiles de un ortocono (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Los primeros ***vertebrados*** que aparecieron en el Cámbrico continuaron en el Ordovícico. Se tratarían de pequeños peces de agua dulce o de aguas marinas próximas a la costa, los *Pteraspídomorfos* y más tarde los *Ostracodermos*, de aspecto aplanado y unos apéndices carnosos, precursores de las aletas, que les daban estabilidad en la natación. *No poseían mandíbula* y se alimentaban por filtración de detritos y agua mediante las branquias, que a la vez utilizaban para respirar. Su característica principal, además de no tener mandíbula, es que su cabeza estaba protegida por una *placa ósea* cuyo análisis tisular microscópico

evidencia que era como una armadura formada por pequeños dientes soldados, con una capa externa de esmalte y una interna de tejido de dentina.

Habrían desarrollado la coraza de la cabeza como defensa contra los predadores que le acompañaban en las aguas donde vivían. No olvidemos que convivían con los conodontos con sus raederas llenas de dientes, o bien con la amenaza de los escorpiones marinos y de los ortoconos, que atacarían a los pequeños peces primitivos. Por eso desarrollaron la estrategia de defensa armando sus cabezas, lo que les dio únicamente un respiro momentáneo, ya que al final del periodo se inventó la mandíbula, terrible cascanueces al que no se le resistirían protecciones óseas y con las que además se podía atacar y morder a piezas mayores.



Recreación digital del ostracodermo Cephalaspis (Wikimedia, CC SA-BY 3.0)

El mundo de las plantas y hongos

Mientras, hace unos 450 millones de años, las plantas en forma de algas verdes, poblaban en busca de la luz las primeras capas de los fondos marinos, *formando tapetes* sobre las rocas o bien estructuras filamentosas y ramificadas. Constituían la base del alimento para muchos de los animales anteriores, y colaboraban en gran manera mediante su función clorofílica al mantenimiento del oxígeno atmosférico. Necesitaban vivir en la humedad, y poco a poco a lo largo del Ordovícico fueron colonizando las corrientes fluviales, que hasta este momento sólo habían disgregado las áridas, grises y ocres tierras. Paso a paso se iban asentando, mezcladas con los limos de las orillas, para lo cual tuvieron que adaptar sus métodos de reproducción a

la cambiante humedad del terreno. En tierra continuaron manteniendo su ciclo reproductivo mediante una primera fase sexuada, con especímenes masculinos y femeninos, seguida de otra posterior de creación y emisión de esporas. Las esporas se desperdigaban fácilmente gracias al arrastre producido por los vientos, no perdiendo la ventaja de la que disponía su esperma cuando habitaban en el agua. Las lógicas consecuencias se derivaban de que tenían a su alcance grandes extensiones territoriales vírgenes, completamente accesibles a pesar de las condiciones ambientales extremas dada su particular estructura, lo que les permitía también perdurar mucho en el tiempo en estado latente. Se han encontrado en Argentina “criptoesporas” fósiles datadas en hace 470 millones de años.



*Criptoesporas de hace 470 millones de años, halladas en Argentina
(revista New Phytologist ⁽⁴³⁾ octubre 2010)*

A pesar de que la capa de ozono era una realidad desde hacía muchos millones de años, el hecho de salir fuera del agua supuso el perder el escudo protector frente a las radiaciones ultravioletas del que sí disponían al estar sumergidas. Sin embargo, desarrollaron un truco. Mediante un proceso evolutivo, las proteínas gestoras del almacenamiento de ácidos grasos, las que se encargan de que las esporas y más tarde las semillas dispongan del material alimenticio suficiente para su desarrollo inicial, se transformaron en enzimas que colaboraron en la fabricación de los flavonoides coloreados, amarillos y anaranjados, que protegían a las células de la acción solar y ayudaban a la fijación del nitrógeno del suelo.

El primer paso hacia una Tierra verde se llevó a cabo a través de los tapetes de plantas livianas y pequeñas, que por su tamaño aún no necesitaban una especial estructura vascular para distribuir la humedad y el alimento por todo su organismo, y que prosperaban junto a ríos y charcas,

asomando sus incipientes brotes por encima de las aguas y los limos en busca de la energía de la luz solar. Sus raíces eran simples apuntes de pelillos y sus “hojas” algún ensanche del tallo que protegería a algún nuevo brote. Las primeras plantas fueron las briofitas -“*planta musgo*”-, del tipo de los musgos y las hepáticas.



La briofita actual Phaeoceros laevis (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Muchos biólogos actuales sugieren que las plantas no hubieran tenido éxito en su colonización de la tierra si no hubiera sido por la colaboración de los **hongos**. Y que posiblemente la ayuda fue recíproca, ya que los hongos en tierra necesitan de detritos vegetales o animales para alimentarse, así que debieron ir juntos en la aventura. Quiero enfatizar que estamos hablando ya de antepasados de los líquenes y micorrizas actuales. Me parece asombroso que las estrategias de mutualismo entre ambos reinos, que tanto benefician a todo tipo de plantas desde las algas hasta las coníferas y las plantas con flores, iniciaran su andadura hace ya muchos años.

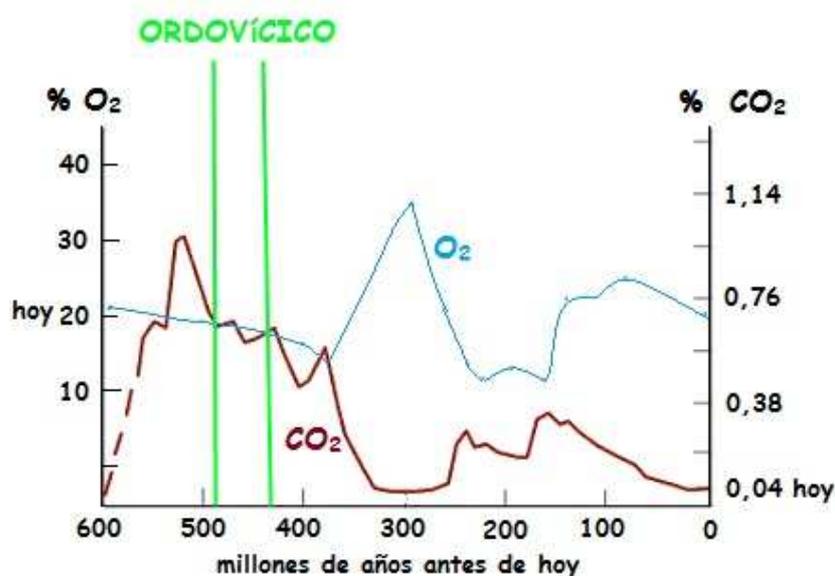
Esta circunstancia hace que se le pueda seguir la pista a la evolución de los hongos, ya que si bien no es fácil que dejen restos fósiles, a no ser sus esporas o posteriormente en gotas de ámbar, sí han podido ser estudiados y descritos al analizar los restos fósiles de plantas que sabemos mantenían una estrecha relación con ellos, lo que ha impulsado el profundizar en los análisis hasta descubrir los restos fúngicos unidos a ellas.

De esta época, hace 460 millones de años, son los primeros fósiles reconocibles de hongos del tipo de los *Glomerales*, que consisten en hifas ramificadas y esporas terminales no asociadas con las planta. Se encontraron cerca de Madison, Wisconsin.

Por su lado, también en el mundo animal se producían ciertos escarceos para colonizar las tierras. Se cree que algunos artrópodos, como los escorpiones marinos y trilobites, y unos pocos gasterópodos, animados por la incipiente vegetación, iban abandonando temporalmente las aguas para llegar a las orillas. No por eso pueden ser ya considerados animales terrestres, dado que tenían necesidad de regresar constantemente al medio acuático para respirar con sus branquias o para depositar sus huevos.

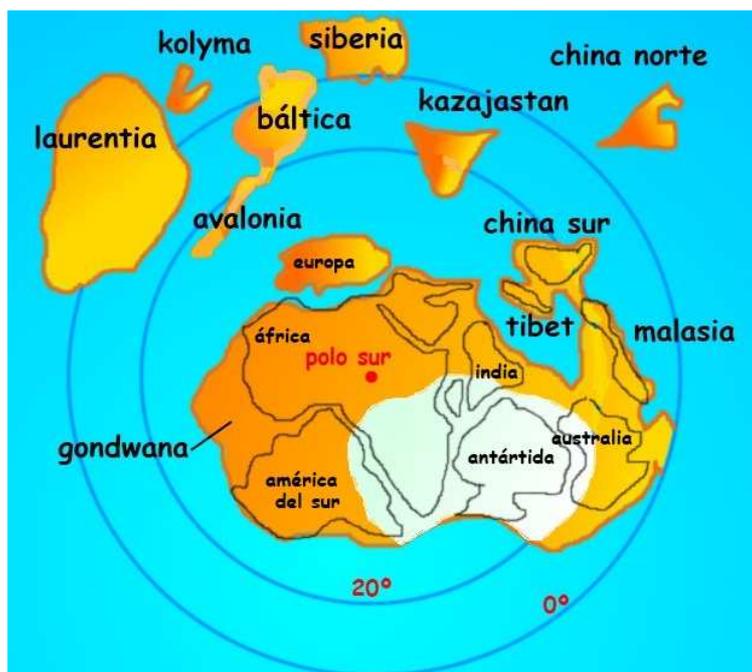
Se acaban los tiempos placenteros

Los últimos años del Ordovícico se caracterizaron por la extrema severidad del clima, que pasó de cálido tropical a glaciario. La variación se debió, por un lado, a que Gondwana pasó a ocupar la posición del polo sur y, por otro, a que se estaba viviendo una larga fase con tendencia a la disminución de la concentración atmosférica de CO_2 y por tanto a una disminución global del efecto invernadero.



La disminución del dióxido de carbono fue posiblemente producido por efecto de la superactiva función clorofílica, favorecida por el excelente clima, y también por el incremento en la fijación de carbonatos en los sedimentos marinos, que secuestraban una buena parte del carbono atmosférico. Hay teorías que indican que las propias plantas terrestres habrían iniciado el proceso de fijación de carbonatos, puesto que se sabe

que con su metabolismo debían extraer de las rocas sobre las que crecían iones minerales como calcio, magnesio, fósforo o hierro. El posterior lavado de estos minerales por las aguas de lluvia habrían llevado los iones hasta el mar habiendo formado rocas carbonatas en el océano a partir del dióxido de carbono disuelto. A la vez se iban añadiendo a los océanos nutrientes como el fósforo y el hierro, lo que habría aumentado aún más las poblaciones de plantas marinas y en consecuencia la fotosíntesis de cianobacterias y algas.



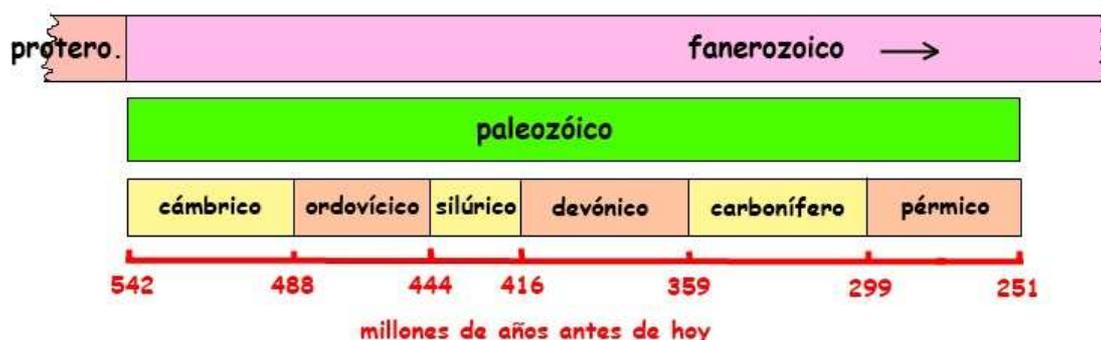
Zona de radiación de la glaciación de Gondwana en el Ordovícico tardío, hace unos 445 millones de años

Como consecuencia de todo ello, entre hace 455 y 445 millones de años la Tierra experimentó dos grandes glaciaciones. Debido a estas glaciaciones gran parte del continente de Gondwana se cubrió de hielo. Esto provocó a su vez el descenso del nivel de los mares. La extinción de la fauna marina fue masiva, un 49% de los géneros, iniciándose en los nichos tropicales del océano Iapetus. Desaparecieron el 50% de los corales y cerca de 100 familias biológicas, lo que representaba el 85% de las especies de fauna. Lo que constituyó la primera grande extinción del Fanerozoico afectó principalmente a los braquiópodos y los briozoos, junto con familias de trilobites, conodontos y graptolites.

Al inicio de la siguiente era, el Silúrico, la Tierra se había recuperado de este periodo frío, aunque posiblemente aún persistieran algunos de los glaciares de Gondwana. Pero esto lo veremos en el capítulo siguiente.

29. El Silúrico

Nos encontramos en los últimos 542 millones de años de la historia. Tras haber disfrutado de las conquistas durante el Hadeico, el Arcaico y el Proterozoico, a partir de ahora la historia presenta otro perfil al ser más conocida, ya que se dispone de infinita información comparada con la de los eones anteriores. Puede parecer que se concreta en una simple y fría nómina de actores, pero el hecho de ser más conocidos los posiciona muy próximos a nuestras emociones. ¿A quién no le interesa saber cómo una planta colonizó la tierra o quién no se excita al oír acerca de la vida de los archifamosos dinosaurios? Esta especie de nueva sensación la inauguramos con el capítulo del Cámbrico y los que le siguieron, habiéndonos quedado temporalmente expectantes tras el último dedicado al Ordovícico.

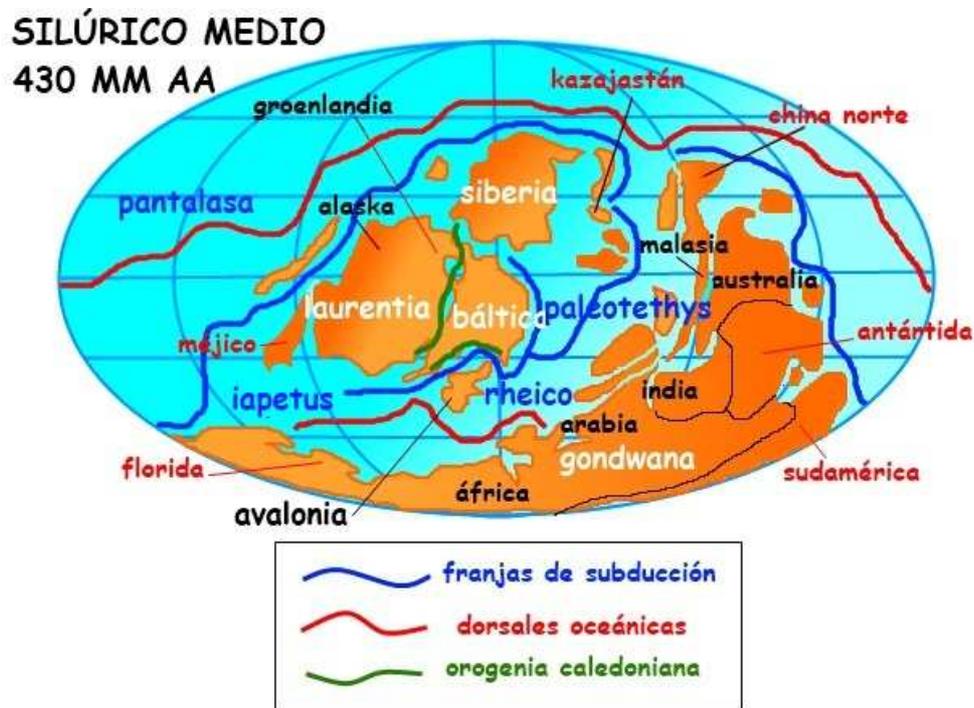


Hoy damos un paso cronológico más para adentrarnos en el siguiente periodo, conocido como Silúrico, que se extendió a lo largo de 27 millones de años, desde hace 443 hasta hace 416.

Como ya vimos por primera vez con el Cámbrico, y continuamos al nominar al Ordovícico, seguimos con la costumbre de nombrar a los periodos geológicos con gentilicios de tribus celtas. Esta última fue bautizada a partir de los siluros, una tribu de Gales.

Habíamos dejado el Ordovícico con Gondwana cubierta de glaciares y el mar de Iapetus cerrándose por la deriva continental de Laurentia, Avalonia y Báltica. El nivel del mar se situaba muy bajo, debido a la enorme masa

de hielo sobre Gondwana, lo que había producido una extinción masiva de vida.

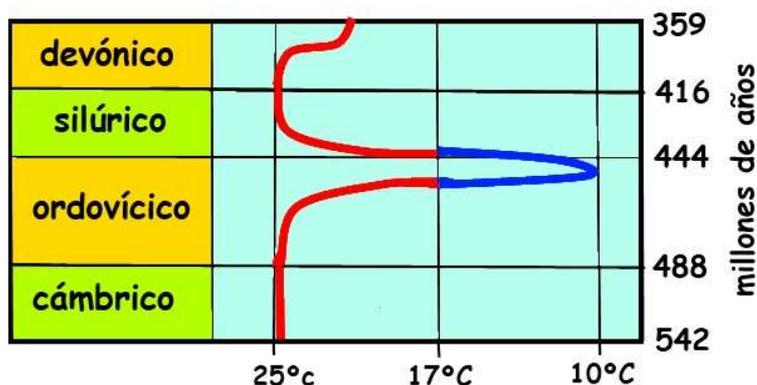


Por el contrario, el capítulo del Silúrico coincide con el comienzo de otra época de templanza climática, por lo que los hielos comenzaron a derretirse y el nivel del mar volvió a subir.

Gondwana siguió su lento balanceo hacia el sur, mientras los más modestos cratones ecuatoriales formaban un nuevo continente llamado Euroamérica, que es el que ocupa la posición central de la figura anterior.

Cuando la protoEuropa -Báltica- colisionó con Norteamérica, el choque plegó los sedimentos costeros que se habían acumulando desde el Cámbrico frente a la costa este de Norteamérica y la costa oeste de Europa. Este evento geológico es conocido como la orogenia Caledoniana (Caledonia es el nombre latino para Escocia), una serie de montañas que se extendía desde el Estado de Nueva York a Europa, incluyendo Groenlandia y Noruega.

Al derretirse los hielos el nivel del mar llegó a ser muy elevado, lo que hizo que gran parte de las tierras ecuatoriales se vieran anegadas. Como ya se ha comentado, esta circunstancia era resultado de un clima cada vez más benigno, lo que favoreció en gran medida el desarrollo de la vida en estas zonas.



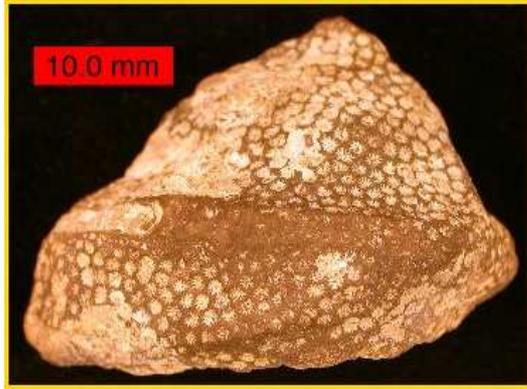
Curva de temperatura a inicios del Fanerozoico (a partir de Paleomap Project⁽⁴⁴⁾, Ch.R. Scotese)

El gran océano de Panthalassa cubría la mayor parte del hemisferio norte, Tethys seguía abriéndose entre la costa occidental de Gondwana y el continente ecuatorial que iba apareciendo por la fusión de pequeños cratones, modelando entre sus tierras nuevos y antiguos océanos, como Rheico, entre Gondwana y Avalonia, Iapetus, entre Avalonia y Laurentia, y Ural, entre Siberia y Báltica.

La biosfera del Reino Animalia

Los poco profundos mares tropicales de las plataformas continentales fueron uno de los principales escenarios en la representación teatral del inicio del Silúrico. En ellos se consolidaron los arrecifes, alcanzando unos tamaños mucho mayores que los de sus antecesores cámbrico-ordovícicos. Como en el anterior periodo, los principales artífices de estas arquitecturas fueron los *briozoos* (recordemos, los “*animales musgo*”), aunque poco a poco se apoderaron del paisaje los *corales tabulados* que construían colonias de células hexagonales, formadas por un esqueleto de calcita y con una apariencia similar a un panal.

Sobre estos sistemas coralinos se asentaba una especie de *esponja* del orden *Stromatoporida*, que disponía de una parte rígida formada por grandes bolas de carbonato cálcico. La fusión de ambos animales fue la que creó los mayores arrecifes de la época, de cinco a diez metros de espesor y más de un kilómetro de longitud. Las algas que se asentaban en sus declives los protegían de la dinámica de las olas, permitiendo la aparición de lagunas tranquilas en donde el crecimiento coralífero se hacía más fácil y estable.



A la izquierda el coral tabulado Protaraea, y a la derecha una esponja stromatoporida (Wikimedia, dominio público)

El entorno medioambiental creado por los arrecifes era el ideal para el desarrollo de pequeños animales. Los estudios de los fósiles acumulados en las cavidades que dejaba el armazón del arrecife dan a conocer que vivían allí una gran variedad de **invertebrados**, al igual que lo que sucede en los actuales arrecifes: braquiópodos, moluscos, bivalvos, gasterópodos, crinoideos y briozoos.

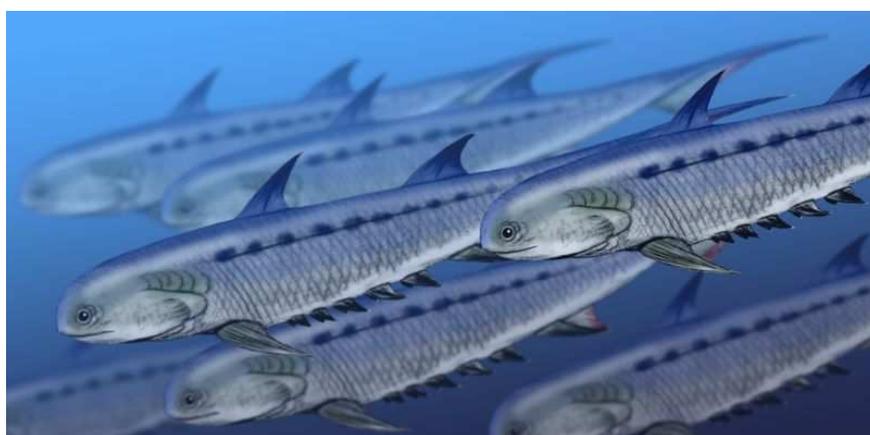


Fósil de Amonites (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

En el mar abierto los *trilobites* se habían recuperado de la extinción del Ordovícico, y los escorpiones marinos su ley arropados por su gran tamaño, que podía incluso llegar a ser de dos metros. Estos últimos lo mismo habitaban aguas saladas como aguas dulces, lo que quizás les colocó en un lugar privilegiado para saltar a tierra. En la frontera con el

siguiente periodo, el Devónico, los moluscos cefalópodos ortoconos iniciaron un cambio de su estructura lineal hacia formas de concha en espiral: los *amonites*, que gracias a su rápida evolución y distribución mundial son excelentes fósiles guía para la datación de rocas

Otro grupo que comenzó a aumentar, como antesala al éxito de diversificación que alcanzarán en el siguiente periodo, el Devónico, fue el de los **peces**. En el Silúrico convivían los *ostracodermos*, peces sin mandíbulas que ya conocemos desde el Ordovícico, con los *placodermos* que fueron los primeros peces *con mandíbulas*, que aparecieron en esta época. También de este periodo son los primeros tiburones espinosos y los peces cartilagosos, pasos decididos de los vertebrados hacia un esqueleto rígido.



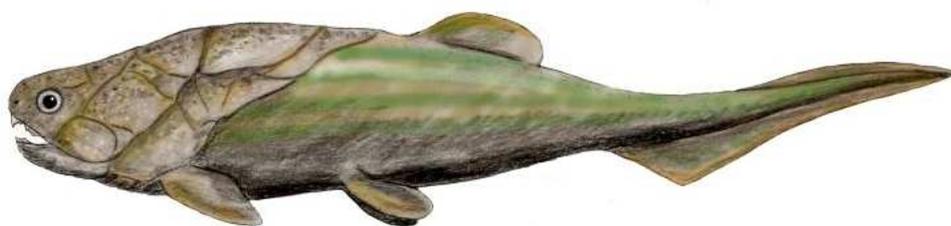
*Representación artística de un banco de tiburones espinosos Climatius
(Wikimedia, GNU FDL 1.2)*

Los *acantodios*, mal llamados tiburones de piel espinada, fueron peces pequeños, caracterizados por tener al inicio de cada aleta una gran espina ósea –menos en la caudal- a pesar de tener esqueleto cartilaginoso. No en vano acantodio significa “*con aspecto de espina*“. Esta particularidad tan característica de las espinas que soportan sus aletas la comparten con los teleósteos -la mayoría de peces actuales-, pero a diferencia de éstos, y como ocurre en los tiburones, no están dotadas de capacidad motriz. Las escamas que recubren el cuerpo son muy pequeñas y apretadas, estando hechas de hueso y dentina, y crecían como proyección de las más antiguas. Sus fósiles los evidencian como los peces más primitivos con mandíbulas.

Los *placodermos* se caracterizaban por la presencia de placas óseas en la parte anterior de su cuerpo, además de tener un número par de extremidades, diseño primigenio de las de los tetrápodos, y de poseer

mandíbulas que se originaron a partir del primer arco branquial modificado. Las placas podían aparecer fusionadas o bien estar articuladas, presentando una especie de junta entre ellas. El resto del cuerpo generalmente se encontraba recubierto de escamas, aunque algunos especímenes podían carecer de ellas. Los dientes -dos o tres pares- no se parecían a los de los vertebrados actuales, sino que eran proyecciones de las placas óseas que formaban la mandíbula.

Estos peces también se caracterizaban por su morfología aplastada, rematada por una cola en forma de aleta caudal vertical y asimétrica. Por regla general no eran de gran tamaño, rondando los 15 centímetros. Poseían una notocorda con espinas a modo de vértebras, normalmente cartilagosas, con forma de Y.



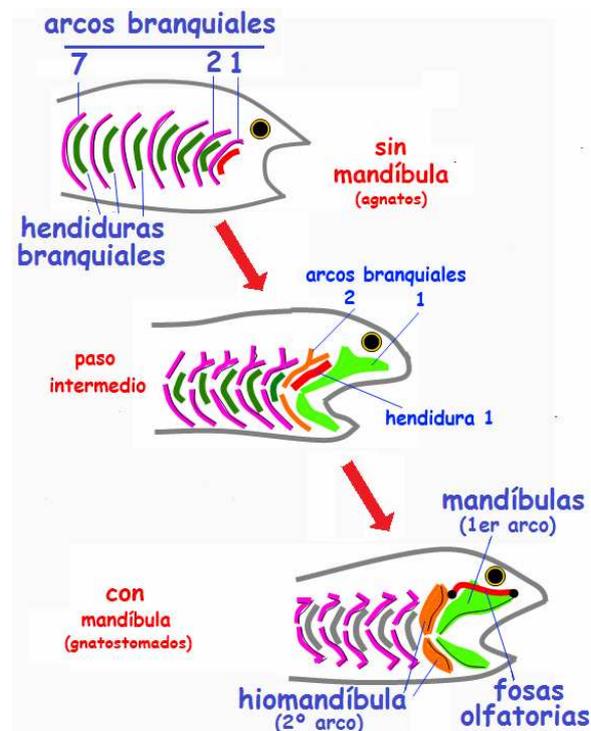
Representación artística del placodermo Coccosteus (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

La gran conquista de la época había sido la **mandíbula**. Su aparición fue un logro evolutivo importante, ya que esta nueva herramienta permitía capturar con más facilidad a las presas, siendo usada más tarde en el proceso evolutivo como elemento de sujeción. La primera mandíbula fósil de estructura moderna conocida es la del placodermo *Entelognathus primordiales* encontrado en un territorio que corresponde a la China actual y con una antigüedad de 419 millones de años.

Una de las características distintivas de los cordados es la presencia de unas *hendiduras* a nivel de la faringe, que es la sección del tracto digestivo entre la boca y el esófago, separadas por *arcos branquiales* de tipo óseo. Este carácter está presente en mayor o menor grado en todos los cordados en fase adulta, e incluso manifestándose ya en fase embrionaria, desde los más primitivos, tipo el anfioxo, hasta los vertebrados más especializados.

Inicialmente en estas aberturas se desarrolló un órgano singular compuesto por una cámara con cilios y mucosidad, que originalmente servía para producir una corriente de agua que transportaría micropartículas alimenticias, las cuales eran retenidas por la mucosidad y después

transportadas más adentro del canal digestivo. Este órgano fue poco a poco ampliando sus funciones, ya que a través de él pasaba un agua muy oxigenada, difundándose las moléculas de este gas, e incluso de yodo, hacia los vasos sanguíneos de las cada vez más irrigadas delicadas paredes. A medida que los cordados fueron evolucionando y necesitar alimentos de mayor tamaño, este órgano perdió el cometido de función “alimentadora” y en su sustitución se fue aprovechando su capacidad “respiradora”, ampliándose los cilios hacia formas plumosas que pasaron a conformar las branquias de animales como peces o anfibios. Los que desarrollaron la respiración hacia la de tipo pulmonar, abandonando la branquial según un proceso del que hablaremos más adelante, siguieron aprovechando su capacidad de absorción de moléculas de yodo para transformarlo en la glándula tiroides, fábrica de hormonas con base en este elemento.



Evolución de arcos y hendiduras branquiales con la formación de la mandíbula y los canales olfativos

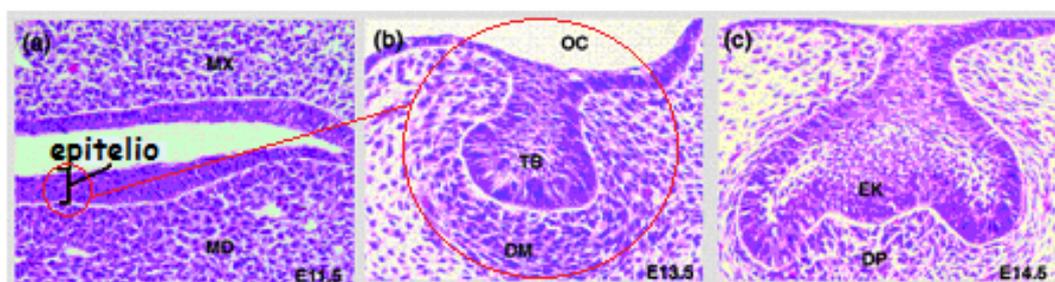
Como hemos mencionado, hubo un momento en que el primer arco branquial y parte del segundo ya no jugaron un papel en el intercambio gaseoso. Así, por ejemplo, en los peces cartilagosos que son relativamente primitivos, el primer arco branquial se encuentra modificado formando las mandíbulas, mientras el segundo forma parte del apoyo de estas mandíbulas al resto del cráneo. La parte superior de los dos arcos se fusionan, creando una fuerte mandíbula superior, quedando embebida entre

ellos la primera hendidura branquial. Con el paso del tiempo se transformó en un par de tubos abiertos por los dos lados al aparecer los orificios olfativos delanteros y los traseros, situados estos por detrás de los ojos. Esos tubos se especializarían en percibir “olores”: en ellos se encontraban una serie de terminales nerviosas dirigidas por un tipo de genes que son prácticamente idénticos a los que tienen los seres que nos vamos a encontrar en el camino de la evolución (anfibios, reptiles, aves y mamíferos). En cada paso evolutivo podemos ver a estos genes crecer en número, lo que se producía a través de sucesivas duplicaciones de los ancestrales.

Posteriormente a la aparición de la mandíbula emergieron los dientes como excreciones óseas de la piel que la recubría, posiblemente de algo parecido a una escama⁽⁴⁵⁾. Se formaban a partir de una invaginación en las dos capas del tejido cutáneo, derivando una de ellas en una estructura interna con dentina y otra en una externa de esmalte.

Los apéndices dentales aparecen a lo largo de un proceso dirigido por una serie de genes comunes en todos los animales con dientes, que poseen incluso las aves aunque en ellas no se expresen, tales como el *gen AMEL* cuya función es la fabricación de la “amelogenina”, el más importante componente del esmalte de los dientes, el *gen ENAM* cuya función es la síntesis de “enamulina”, otro componente del esmalte o el *gen DSPP* cuya función es la síntesis de la “sialofosfoproteína” de la dentina.

El proceso funciona mediante la colaboración de dos tipos de tejidos distintos. Uno es el epitelial de la boca y otro es el mesenquimal que procede del mesodermo -recordemos que es el tejido intermedio que se genera durante el desarrollo del embrión-.



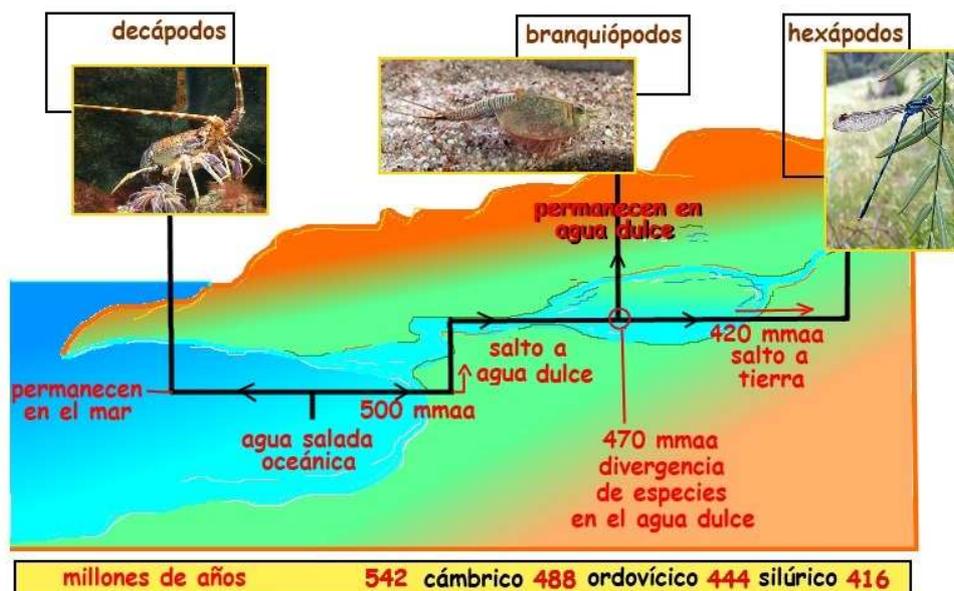
De izquierda a derecha, primeras etapas de la formación de un diente. Las células del epitelio (primera capa) se introducen en el mesénquima (capa situada debajo del epitelio) y forman un “bulbo” desde el cuál se empezará a desarrollar el diente (Peters H & Balling R. 1999. “Teeth: where and how to make them”⁽⁴⁶⁾)

Dejemos el detalle del nuevo invento y continuemos con el paseo por la biota del Silúrico, que lo habíamos comenzado en el mar. Debemos ahora alejarnos de él y adentrarnos en tierra firme, en donde nos encontramos evidencias de **insectos primitivos**, aún sin alas y sin la fase de metamorfosis. Se tratarían de animales parecidos a los *archeognatha* o los *thysanura*, conocidos popularmente como pececillos de cobre y de plata respectivamente. También de esta época están datados los fósiles más antiguos de miriápodos.



Imagen del pececillo de plata thysanura Lepisma saccharina (Wikimedia, CC BY 3.0 Unported)

Sabemos que los *hexápodos*, entre los que se encuentran los *insectos*, evolucionaron en agua dulce como una rama de los crustáceos a finales del Silúrico o principios del Devónico, hace unos 420 millones de años. En el agua quedaron los branquiópodos. En la imagen siguiente puede verse el camino de todos ellos.



Evolución de los artrópodos y su conquista de la tierra (imágenes de Wikimedia, GNU FDL 1.2 y uso libre)

Como comenta Jesús Espí en su blog Entomoblog, “*la colonización de la tierra por los hexápodos parece coincidir con la de los otros grupos de artrópodos terrestres -miriápodos y quelicerados- a finales del Silúrico. Además, el origen crustáceo de los hexápodos puede solucionar el misterio de por qué los insectos no han sido capaces de extenderse a nichos ecológicos marinos y la razón de que los crustáceos apenas hayan colonizado la tierra a pesar de ser un linaje con más de 500 millones de años de antigüedad: en realidad los crustáceos sí colonizaron la tierra, pero en forma de insectos, y como los primeros ya se habían diversificado y ocupado todos los nichos marinos potenciales, esto impidió a los segundos extenderse por el mar. Además, también puede explicar la ausencia de restos de hexápodos marinos en el registro fósil antes del Devónico*”.

Las plantas

Las plantas que habían empezado a colonizar la tierra a finales del periodo anterior, el Ordovícico, siguieron extendiéndose por el nuevo nicho.

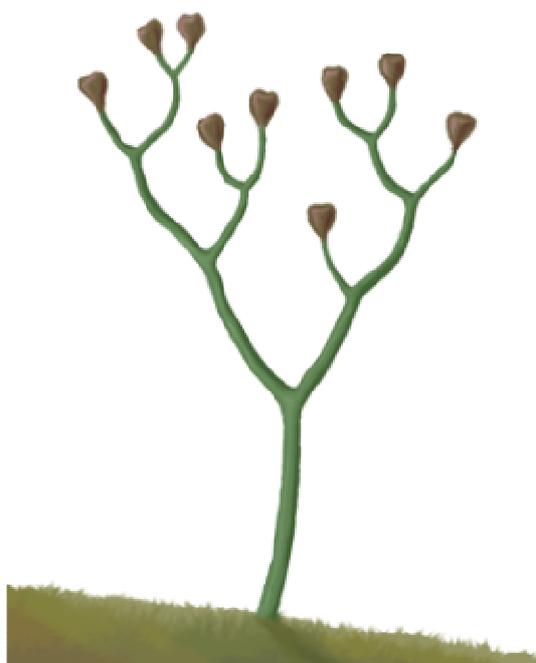
Las primeras plantas erguidas que aparecen en la tierra carecían de raíces, sistema vascular y hojas, factores que determinaron más tarde el éxito de sus descendientes. Esencialmente estas plantas eran tallos rígidos sencillos. Se han encontrado fragmentos de ellas en rocas silúricas, y seguramente fueron las pioneras que vivieron cerca de corrientes o charcas de agua dulce.

En el agua dulce encontraron disuelto el CO₂ que necesitaban, así como fosfatos y nitratos esenciales para la construcción de las moléculas indispensables. Pero provenían del mar, y los citoplasmas de sus células eran una extensión de las aguas saladas, presentando una forma coloidal muy fina de diversos iones y sales, con unas concentraciones mayores que las del agua dulce del nuevo entorno. Simplemente por acción de ósmosis a través de la membrana celular tenderían a absorber agua en su interior, lo que a la larga supondría su destrucción. Su problema fue de qué forma controlar en el agua dulce los líquidos internos de las células. Sabemos que lo consiguieron, siendo seguramente la superación de este condicionante lo que permitió el éxito evolutivo de las células vegetales que fueron favorecidas por la aparición de unas *membranas celulares más gruesas y resistentes*.

Resuelto este problema, el siguiente paso fue ampliar su campo de acción explotando otros ambientes húmedos cíclicos, como charcas estacionales o

manantiales que seguían el ciclo hidrológico anual. Al haber endurecido la pared exterior de sus células, las plantas se habían preadaptado para evitar la sequedad del aire y la radiación ultravioleta, pudiendo soportar la estación seca y crecer nuevamente durante la lluviosa. La idea de una pared protectora fue traspasándose poco a poco de las células a la planta completa, desarrollando una *cutícula exterior* que también daba rigidez al conjunto. Pero esta mejora llevaba incorporado un nuevo problema: la planta debía intercambiar con su medio, a través de una pared gruesa, los gases necesarios para el metabolismo de sus células. La solución vino por una especialización adaptativa de alguna de ellas que aprendieron la función de hacer de puerta: cada par de ellas se abría y cerraba dejando un *estoma* por donde la planta podía “respirar” o “excretar”.

Resueltos los problemas, comenzaba una nueva guerra. En la competición entre vecinos saldrían mejor paradas aquellas plantas que pudieran proyectar mejor a sus células fotosintéticas hacia la luz solar. En los abigarrados tapetes de briofitas de entonces esto sólo se podría conseguir “estirando el cuello”, creciendo por encima de las demás. Pero ello conllevó una dificultad añadida: cuanto más se alejaban del húmedo suelo más difícil era el cuidado de las células extremas, a las que había que llevar alimento y de las que había que eliminar los residuos de su metabolismo. Por eso, la primera innovación adaptativa aún antes que la aparición de raíces y hojas fue la invención del *tejido vascular*.



Modelo de Cooksonia (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

El primer registro fósil de **plantas vasculares**, esto es, plantas terrestres con tejidos que transportan los nutrientes, aparece en el período Silúrico. La primera planta vascular conocida es la riniofita *Cooksonia*, del Silúrico superior, hace unos 420 millones de años. Tenía forma de maza de unos 10 centímetros de altura, sin raíces ni hojas. La cabeza era el órgano generador de esporas y los tallos fueron evolucionando a lo largo de los casi 200 millones de años que existieron estas plantas sobre la Tierra: los primeros fósiles no presentan una cutícula exterior ni estomas, por lo que se cree que los intercambios gaseosos que necesitaba se hacían directamente entre sus células y el medio ambiente.

Otras plantas fósiles vasculares del Silúrico fueron los lycopodios primitivos, como la *Baragwanathia* de Australia, que aparecen por primera vez en el registro fósil de finales del Silúrico temprano y que se diversificaron bastante durante el medio y el tardío. Sus rizomas habrían ayudado a estabilizar bancos de arena y limos y zonas de aguas poco profundas.



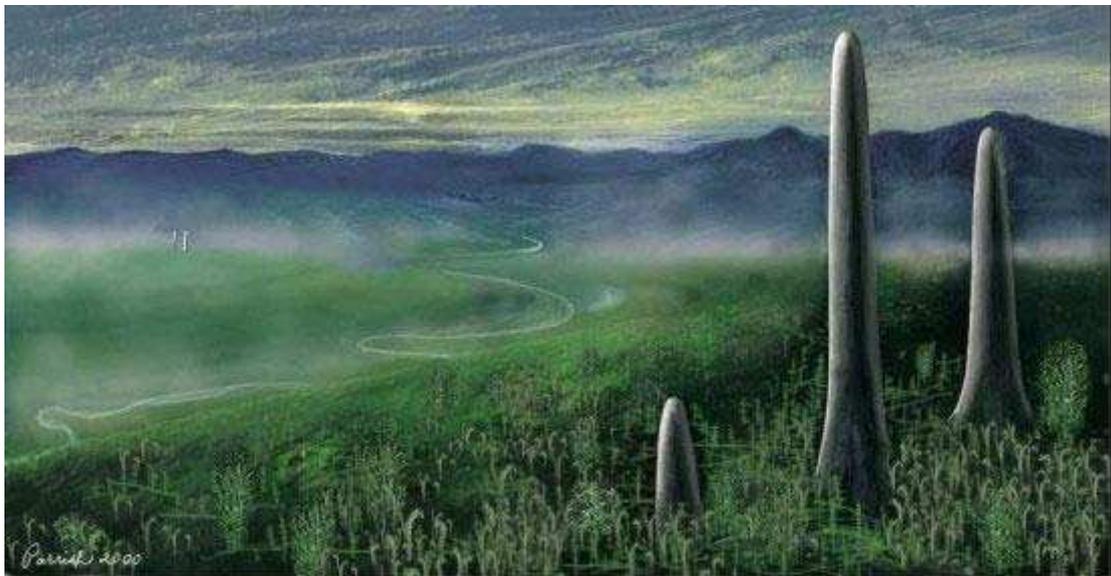
Modelo artificial de lycopodio Baragwanathia (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

El aumento de la abundancia y la diversidad de los animales que vivían en los estuarios o que se aventuraban remontando corrientes de agua dulce se puede atribuir a aquella progresiva presencia de plantas vasculares en hábitats acuáticos y terrestres que comenzó a finales del Silúrico. Además, la descomposición de su materia habría aumentado la cantidad de alimento disponible en estos nuevos hábitats. Posiblemente esta incipiente

abundancia de alimento fue lo que atrajo a algunos artrópodos, tipo miriápodo o hexápodo primitivo, a aventurarse sobre la tierra a finales del Silúrico.

Los hongos

En el Ordovícico, los hongos habían iniciado de la mano de las plantas la colonización de tierra firme. Sus fósiles más antiguos de este periodo, el Silúrico, son de hace unos 443 millones de años. Se tratarían de oomicetos, unos protozoos pseudohongos, asociados a invertebrados marinos y en entornos terrestres hifas -elementos filamentosos subterráneos de los hongos- fósiles de presuntos ascomicetos asociados a pequeños artrópodos.



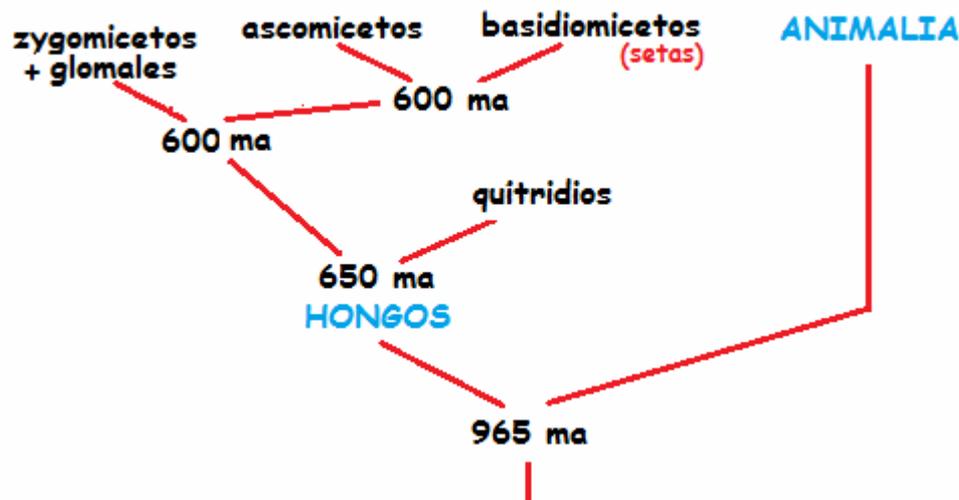
Paisaje del Silúrico tardío en donde asoman los inmensos carpóforos de los Protaxites (Ilustración: Elsevier/Hueber, NewScientist Environment⁽⁴⁷⁾)

Se han encontrado también otros fósiles sorprendentes de hongos, datados hace 422 millones de años, que inicialmente se habían asignado a algún tipo de planta, quizás un tronco de conífera. Realmente se trata del carpóforo -la seta- del basidiomiceto *Protaxites*. Su altura llegaba a alcanzar los 8 metros y crecía adoptando una forma parecida a la de un tronco de árbol compuesto por estructuras tubulares concéntricas. Sin lugar a dudas contrastarían en extremo con las pequeñas e incipientes plantas vasculares, como se ha intentado reproducir en el verde paisaje del Silúrico de la imagen anterior.

Según algunos investigadores, ya en esta época estarían presentes los principales grupos fúngicos, aunque curiosamente hay que esperar

al inicio del próximo periodo, el Devónico, para encontrar los primeros fósiles de los tipos de hongos más antiguos: los quitridios y los zygomycetos.

Reproducimos aquí por comodidad la filogenia de los hongos que ya habíamos presentado en el capítulo 16 en el que hablábamos sobre el árbol filogenético del Precámbrico.



Cronología filogenética de los hongos de acuerdo a los estudio⁽⁴⁸⁾ de Berbee y Taylor (2001)

Con esto damos por finalizada la visita a vista de pájaro del Silúrico, periodo en el que los artrópodos salieron definitivamente del agua al amparo de las cada vez más potentes plantas vasculares. En los próximos capítulos nos adentraremos en el periodo Devónico, donde no sólo quedaremos admiraremos con las conquistas del Reino de las plantas, sino que seremos espectadores de primera fila de la aventura de los peces poblando definitivamente un nuevo hábitat, el terrestre.

30. El devónico: desarrollo de las plantas

Siguiendo el recorrido cronológico hoy nos toca avanzar hacia un nuevo periodo geológico. En el capítulo anterior nos quedamos en el año 416 millones, anterior al día de hoy, por lo que ahora nos toca dar un paso más y adentrarnos en el Devónico, que duró hasta hace 359 millones de años. Su nombre procede de Devon, un condado ubicado en la península de Cornualles, en el suroeste de Inglaterra, donde las rocas de este periodo son muy comunes.



A este periodo le podemos poner la etiqueta de “el de las tres migraciones”: las plantas se extienden por la tierra llegando a formar enormes bosques; los artrópodos la colonizan fundando la estirpe de insectos y arácnidos; y los peces, después de su evolución en el agua, siguen sus firmes pasos hacia tierra firme.

La configuración de los continentes es aún semejante a la del Silúrico. Gondwana dominando la posición austral mientras Siberia migraba hacia el norte. Entre los dos se consumaba la unión de Laurentia, Báltica y Avalonia que formaron sobre el ecuador el provisional continente de Euramérica. Su posición geográfica le confirió una climatología seca, que se tradujo en unas zonas prácticamente desérticas en donde se formaron los antiguos depósitos sedimentarios de arenisca roja, compuesta por hierro oxidado de color rojo características de las zonas secas. Es por eso que a Euramérica se le conoce también como el continente de las Viejas Areniscas Rojas.

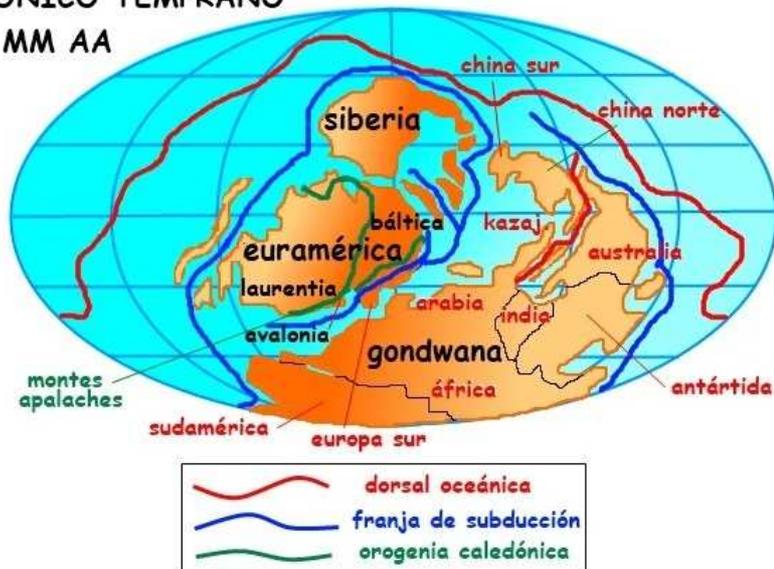
La orogenia Caledónica completa su estructura y es seguida, al ir cerrándose la proximidad entre Laurasia y Avalonia, por la orogenia

Acadia que formó los montes Apalaches, actualmente en la costa este de Estados Unidos.

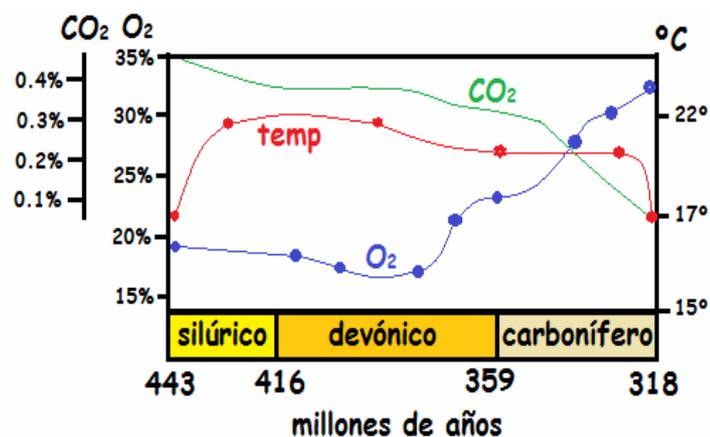
Poco a poco se iba acercando Gondwana, que empujaba desde su posición sur, hacia Euramérica, firmemente asentado en su posición ecuatorial, haciendo desaparecer progresivamente el océano Rhéico, al sur. Al mismo tiempo la deriva norte de Siberia le dirigía hacia posición de colisión con Euramérica, haciendo cada vez más angosto el océano Ural.

DEVÓNICO TEMPRANO

400 MM AA



El nivel del mar era elevado en todo el mundo y gran parte de las tierras estaban sumergidas bajo aguas someras donde vivían los organismos de arrecifes tropicales. La intensa actividad de construcción de estos arrecifes indica que el clima devónico fue en general cálido y estable. Sin embargo, la proliferación de las plantas en tierra firme introdujo un nuevo vector en la fotosíntesis, incrementándose la absorción de CO_2 atmosférico y, como consecuencia, disminuyendo la capacidad invernadero de la atmósfera.

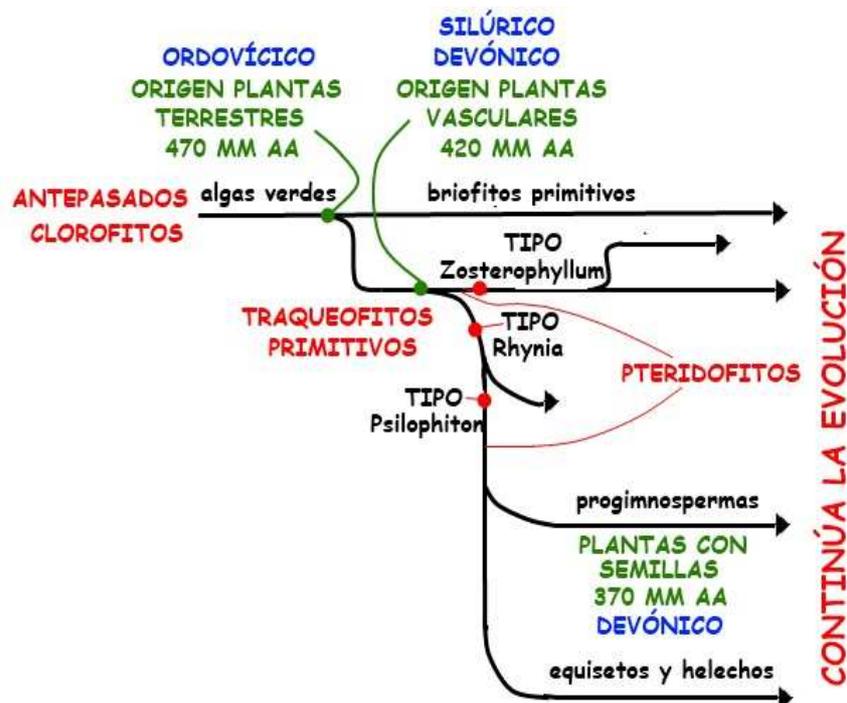


Quizás por ello a finales del Devónico comenzó un progresivo enfriamiento de la Tierra. Como resultado del incremento de la fotosíntesis, en la atmósfera la concentración de oxígeno se incrementó, acercándose a los niveles actuales del 21%.

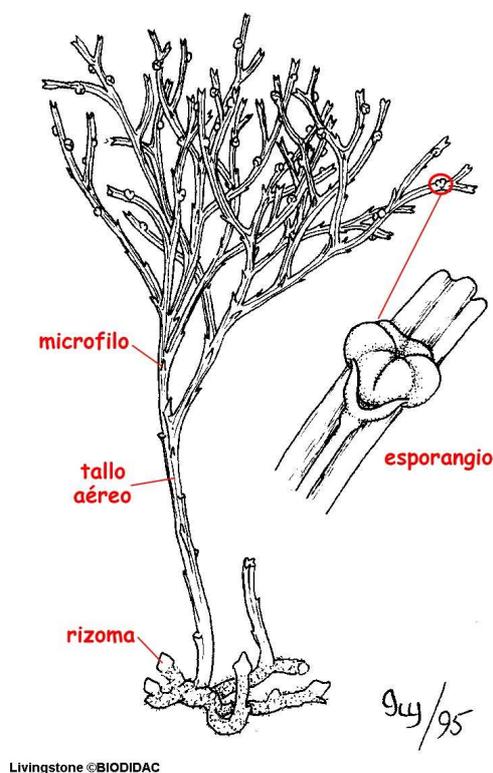
Las plantas

Durante este periodo el paisaje terrestre cambió drásticamente. La paleta de colores se orientó hacia el verde gracias al desarrollo de las plantas. Dejamos en el Silúrico algunas breves pinceladas iniciales próximas a las corrientes y charcas de agua, provocadas por los organismos que se esforzaban en su evolución por conseguir tallos cada vez más altos. Aún no se había descubierto la estrategia de prosperar en horizontal, cosa que harían mucho más tarde las gramíneas en sus inmensas praderas. En el Devónico la tierra firme era la gran oportunidad: hacía tiempo que la capa de ozono se había formado y los rayos ultravioleta no constituían ya ninguna amenaza. La luz del sol se podía tocar ya con las manos, y las plantas fueron a por ella.

La competencia entre plantas vecinas en busca de la luz obligaba a “bombear” los nutrientes cada vez más alto, por lo que las soluciones que favorecían este bombeo o incluso el intercambio de gases en las alturas fueron las que prosperaban a través de un camino lento pero continuo. Se desarrollaron las plantas vasculares apoyadas en el perfeccionamiento de los conductos internos y de los estomas superficiales.



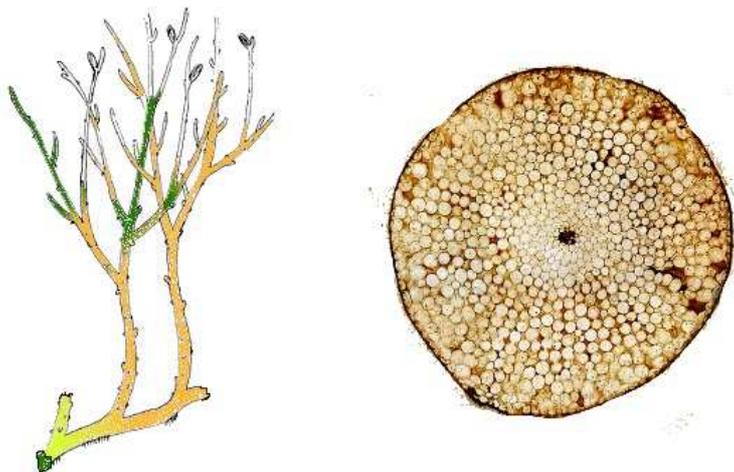
En la anterior figura podemos ver el esquema de evolución de las plantas durante el Ordovícico y Silúrico, pasando desde los más ancestrales clorofitos a los traqueofitos, y con posterioridad a los pteridofitos, para llegar al Devónico.



Psilofito (a partir de BIODIDAC, CC BY NC 4.0)

Ya conocimos a la riniafita *Cooksonia* en el Silúrico, con sus esporangios en forma de campanillas al viento, que continuó con éxito a lo largo del Devónico. Podemos considerarla casi la fundadora de la familia de los psilofitos -las plantas “φυτό”, desguarnecidas “ψιλόζ”-. Estas plantas, que alcanzaban una altura de 60 centímetros, carecían de raíces y casi de hojas, las cuales en todo caso eran pequeñas y parecidas a escamas, expansiones de la cutícula de sus ramillas. De todas formas tenían un pie común en forma de un tallo rastrero horizontal de donde partían vástagos ramificados, verticales y verdes.

Otra planta de la misma familia aunque más desarrollada fue la *Rhynia*, de la que se conocen muchas evidencias fósiles. Presentaba unos esporangios más desarrollados y un rizoma bajo tierra que parece ser estaba asociado a algunos hongos. Esta circunstancia hace pensar que en la conquista de la tierra por las plantas tuvo mucho que ver esta relación simbiótica.



Representación de Rhynia y un corte de su tallo en donde se observan los canales vasculares internos (Wikimedia, GNU FDL 1.2 y CC BY-SA 2.0 UK: England & Wales)

Los fósiles que hemos encontrado de finales del Devónico nos muestran restos de troncos y hojas, por lo que podemos imaginarnos grandes extensiones de formas arbóreas y bosques. Esta rápida aparición de variados grupos de plantas y formas de crecimiento se la conoce como la “**Explosión Devónica**”. Y en esta aventura tuvieron parte fundamental la utilización de nuevos polímeros como la **lignina** o la **celulosa**, que surgieron a partir de una pérdida de agua por polisacáridos y que aportaron rigidez, flexibilidad y soporte a estos organismos.

Fue una solución de ingeniería mecánica y de resistencia de materiales que resolvió un problema con la ayuda de estos polímeros, apoyados a su vez por la colaboración de la tensión superficial, que impulsaba el movimiento de líquidos por el interior de los cuerpos de las plantas venciendo a la fuerza de la gravedad.

También aparecieron otros problemas que exigían soluciones, en este caso de ingeniería bioquímica. La “irracional” e ineludible batalla por conseguir ser los primeros en llegar a los rayos de sol llevó al “gigantismo”, desde las pequeñas plantas hepáticas a los encumbrados árboles. Era evidente que la mayor altura y complexión debía ser un handicap a la hora de mantenerse erguido, por lo que poco a poco necesitaron enraizarse sólidamente en la tierra. Pero aún más crítico debió ser el que este mayor volumen corporal suponía más necesidad de nutrientes, más necesidades de agua, más necesidades de energía y más necesidades de gases atmosféricos, es decir llevaba consigo un metabolismo más ávido. En una primera instancia, el incremento en los intercambios de las moléculas necesarias para la vida y

el mayor aprovechamiento de la luz solar vinieron a través de cambios evolutivos en raíces, hojas y estomas. Sin embargo, el “gigantismo” iba haciendo su labor callada hacia otra modificación menos perceptible: al crecer la masa corporal su volumen se incrementaba con el cubo del crecimiento, mientras que la sección de las redes tubulares por donde se distribuyen los nutrientes, la sección de tronco y ramas, lo hacía con el cuadrado del crecimiento. El resultado lógico debería haber sido el colapso del metabolismo por las limitaciones de abastecimiento. Pero la realidad nos demuestra lo contrario: el metabolismo no colapsó sino que se atenuó, el organismo aprendió a vivir más relajadamente, más despacio, cosa que sucederá más tarde también con los animales que agigantaron sus formas. Quizás esta circunstancia fue la que provocó en los árboles una mayor longevidad y estabilidad vital.

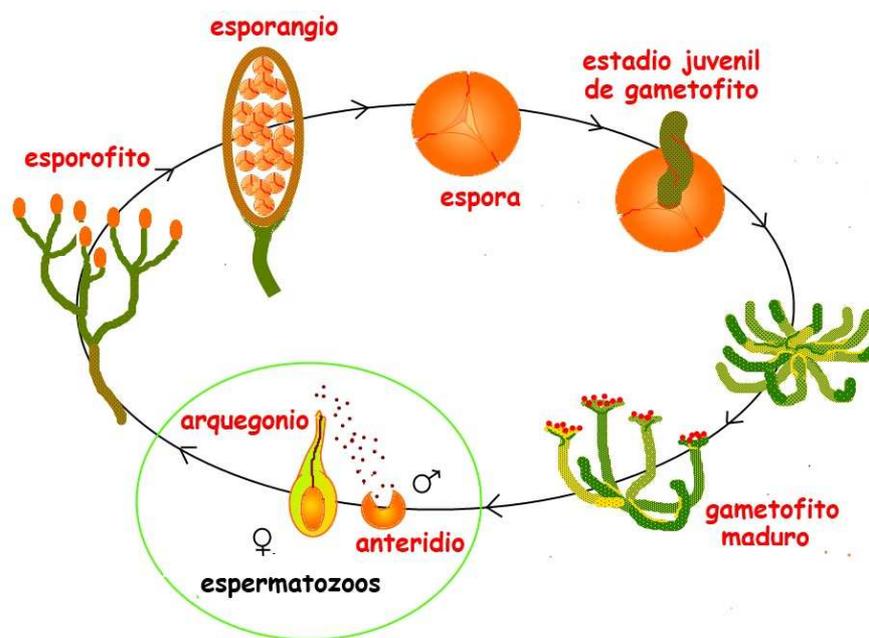


Imagen tomada por un microscopio electrónico de un estoma de una planta (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Pero con todo lo anterior no se acabaron los problemas que conllevaba la altura. Se planteaban también nuevos retos desde el área de la reproducción. Recordemos que las pequeñas briofitas vivían junto al agua, a su amparo. Y se aprovechaban de esta humedad para que los gametos generados por los tallos masculinos “nadaran” hasta encontrar un tallo femenino, allí ascender y fertilizar el correspondiente óvulo. El resultado sería un nuevo tallo con el esporangio repleto de esporas, embriones con espoleta de retardo. Cuando las esporas estaban maduras se dejaban libres y ahí donde llegaban generaban un nuevo tallo masculino o femenino que cerrarían el ciclo de reproducción. Era un poco complicado, pero eficaz. En todo este proceso el camino de los gametos masculinos era corto y la vía

húmeda ayudaba. Pero al ir creciendo, esta aventura era como subir en bicicleta al más complicado puerto de montaña. Así que se optó por diferenciar los tamaños: las plantas en su fase generadora de gametos seguirían pequeñas, mientras que en la fase generadora de esporas desarrollarían altura. Pero esto era muy arriesgado en un mundo donde los animales terrestres comenzaban a campar por sus anchas, alimentándose muchas veces con los jugosos tallos verdes donde estaban las células sexuales. Así que la naturaleza seleccionó otro camino de éxito uniendo la fase sexuada y la asexuada, quedando los pequeños gametofitos incrustados en el alto esporangio: **iban a llegar las plantas con semilla.**

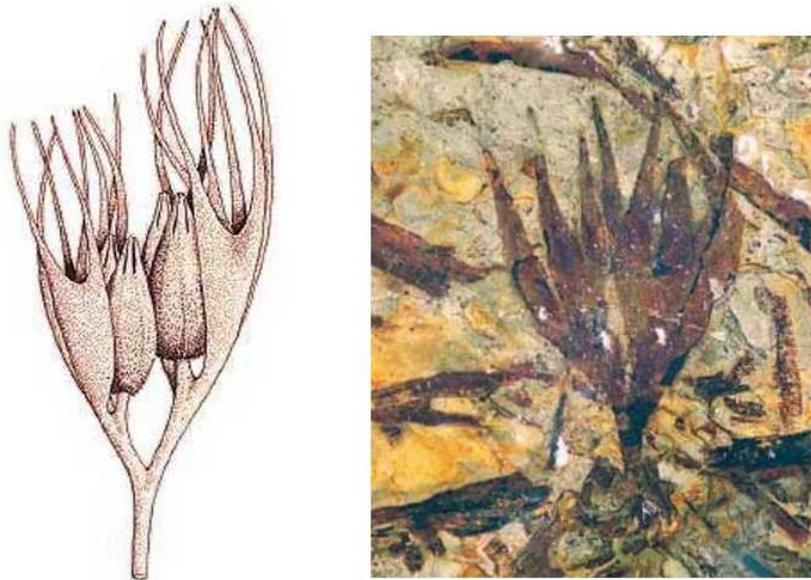
El proceso de transición fue progresivo, partiendo de unas plantas, como los musgos, en las que la fase haploide, de gametos masculinos y femeninos, era la más persistente mientras que la diploide, de embriones - esporas- la más corta en el tiempo. Se pasó después a otro tipo de plantas en las que las dos fases no eran claramente discernibles, se alternaban las generaciones de gametofitos dominantes con las de esporofitos dominantes. Le siguió una época de incertidumbre que culminó con la aparición de las plantas con semilla, en las que los gametofitos son residuales. Así en las gimnospermas, que triunfarán en el Carbonífero, los gametofitos son parte del esporofito o semilla, y en las más evolucionadas plantas con flor, las angiospermas del Cretácico, los gametofitos son unas simples células, siendo la triunfadora el esporofito que ya no es tal sino una semilla.



Ciclo reproductor de las Rhynias

La semilla es un embrión equivalente a una espora joven, con un tejido nutritivo asociado rodeado de una cubierta de protección. A fin de cuentas se asemeja a algo así como a un huevo animal fecundado que hubiera quedado en estado latente, a la espera de condiciones favorables para iniciar la germinación y desarrollo.

Las primeras plantas con semillas datan de hace unos 370 millones de años. El fósil más antiguo que se conoce de este grupo es *Elkinsia polymorpha* y consiste en unas ramitas con semillas. Otro fósil un poco posterior es *Archaeosperma arnoldii*, en el que se ven cuatro óvulos rodeados por unos apéndices alargados que constituyen una especie de cúpula. Estos antecesores presentaban las semillas directamente sobre las ramas, y no disponían de estructuras especializadas a su alrededor: nada que se pareciese a una flor.



A la izquierda Archaeosperma arnoldii y a la derecha Elkinsia polymorpha (Imagen: Pettitt & Beck, 1968, CNRS y Jardín Botánico de Córdoba, fair use)

Pero en realidad las plantas con semilla son patrimonio del siguiente periodo, el Carbonífero, así que vayamos a los verdaderos reyes del Devónico.

Ya hemos hablado de las rinafitas. Podemos hablar también de los licopodiofitos -que se desarrollarían en todo su esplendor durante el siguiente periodo, el Carbonífero-, de los pteridofitos ancestros de los helechos, de los que hay una gran evidencia fósil de sus troncos y hojas, o

de las progimnospermas antecesoras de las modernas plantas con semilla, cuyo espécimen mejor conocido es el *Archaeopteris*, con 20 o 30 metros de altura, un árbol fósil con hojas de tipo helecho encontrado en todo el mundo desde el Devónico Superior al Carbonífero Inferior. No hay que confundir a este árbol con el *Archaeopteryx*, un animal considerado la primera ave, al cual visitaremos en el correspondiente capítulo.

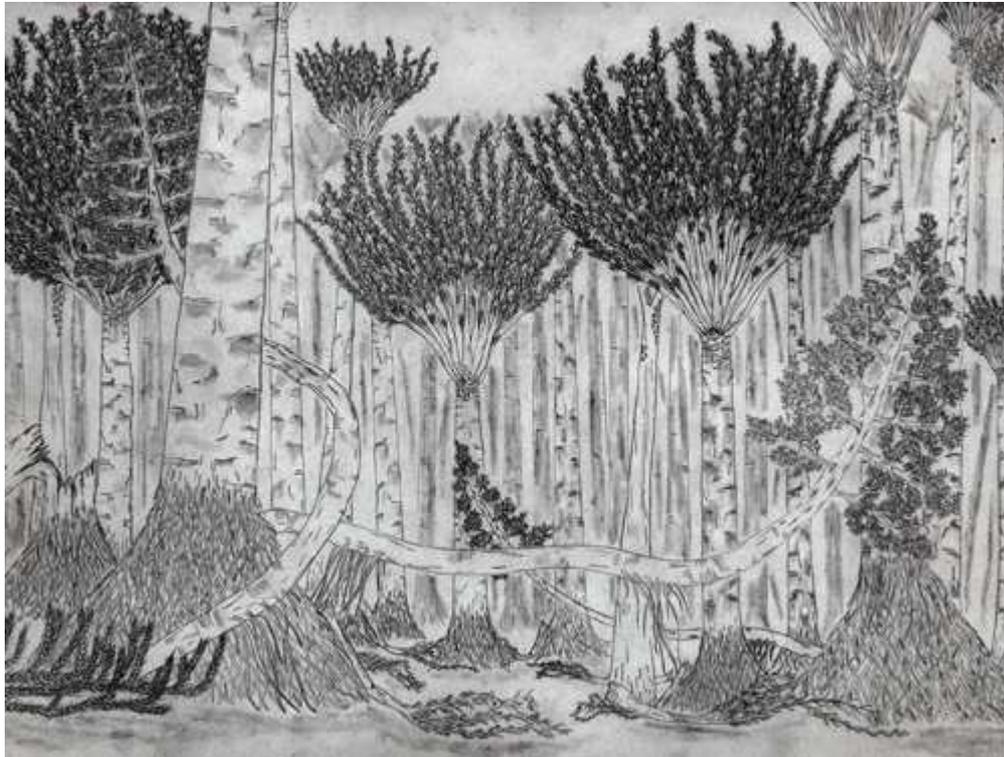


Representación y fósil de Archaeopteris hibernica (Imagen: Dennis C. Murphy, fair use, y Wikimedia, dominio público)

En un lugar próximo a Nueva York, con una historia que data de hace 380 millones de años, se encuentra el yacimiento de Gilboa. En él se han podido observar restos muy completos de un bosque que se había desarrollado en una región costera pantanosa inundada, con clima tropical, llena de grandes *Eospermatopteris* que recuerdan en la forma al bambú actual -aunque no está emparentado-, y con un sistema de raíces poco profundo que se extendía en todas direcciones. Ello favorecía el arraigo de otras plantas, como los *Aneurophytaleans*, que poblaban los suelos del bosque como los modernos helechos, formando una asociación ecobiológica con el resto de árboles, en cuyas espesas redes de raíces se apoyaban para trepar hasta el dosel del bosque de manera similar a como lo hacen algunas lianas tropicales en la actualidad.

En el mismo emplazamiento se han encontrado ejemplares arborescentes de *Lycopsida*, aunque son menos abundantes que las dos especies anteriormente mencionadas. Tenían unos troncos de 11 centímetros de

grosor y 4 metros de altura. Estos vegetales constituyen un grupo muy antiguo de plantas vasculares sin semilla que están emparentados con los modernos licopodios. Más tarde, durante el Carbonífero, estas plantas contribuirían a la formación de abundantes masas de carbón.



Reconstrucción de cómo era el bosque devónico de Gilboa con los altos Eospermatopteris y las trepadoras Aneurophytaleans. En la esquina inferior izquierda asoma una Lycopsida (Ilustración: Frank Mannolini, New York State Museum, fair use)

Los árboles caducifolios producirían cantidades considerables de hojas que al pudrirse debían generar unos detritos muy nutritivos. El nuevo escenario provocado por este tipo de plantas tuvo que introducir muchas oportunidades en el desarrollo de la biosfera. Por un lado se incrementaban las fuentes de alimentación utilizables por los organismos heterótrofos, minúsculos artrópodos y hongos. Por otro lado aparecían otros y variados beneficios, como que la cobertura arbórea preservara de las radiaciones solares ampliándose así los ambientes húmedos, o como que el ambiente creado suponía una oportunidad para ocultarse a la vista de otros animales, ya fueran predadores o predados. Todo ello favoreció e impulsó la coevolución entre animales y plantas, entre otras la relación alimentación/transmisión de esporas/semillas. Se había abierto un inmenso

nicho nuevo del que rápidamente se aprovechó la Vida. El potente océano dejó definitivamente de ser la única cuna para los organismos vivos.

Los hongos

En el yacimiento escocés de Rhynie Chert, datado en hace 410 millones de años, posee un registro fósil de hongos, en particular los más antiguos del grupo de los quitridios y de los zygomycetos -416 millones de años-. En este yacimiento se han localizado ejemplares de hongos parásitos de plantas, de forma que se pueden observar especímenes de vegetales colonizados por hifas de hongo. También muchos ejemplares presentan relaciones de saprofitismo (modalidad de nutrición a partir de los restos de otros organismos) similares a las actuales. Existen también ejemplos de hongos parásitos de otros hongos. Asimismo se ha encontrado un hongo que formaba micorrizas en las raíces aéreas y subterráneas de las plantas, como también a varios hongos zygomycetos asociados a cianobacterias en estructuras similares a líquenes. Es decir, parasitismo, saprofitismo, simbiosis de tipo liquen o micorriza... el abanico completo de la ecología fúngica actual existía ya hace más de 400 millones de años.

Vamos a dejar a los hongos habitando un paisaje que realmente había cambiado drásticamente a lo largo de este periodo. La tierra estaba repleta de plantas, desde las más humildes junto a los arroyos hasta las que formaban majestuosos bosques de árboles con una copa tipo palmera y hojas como helechos. Las tierras estaban asentándose gracias a sus raíces. Por debajo de estos colosos ya no sólo se oía el rumor de las aguas o el deslizarse del polvo movido por el viento, sino que de vez en cuando parece escucharse un ligero crepitar de hojas secas, un balanceo de una ramita, un tímido avanzar de un insecto, atento a conseguir comida y no ser comido. Le gusta la materia vegetal y a lo mejor confiaba en que los hongos empezaran la fermentación para aligerar su digestión. Era de esperar que los primeros hexápodos que en los mares ramoneaban algas, al salir del agua siguieran con sus hábitos alimenticios. Pero no estaban solos. Al igual que sucedía en las pantanosas costas, otros artrópodos, como pudieron ser los escorpiones marinos, les seguían la pista. El silencio tenía las horas contadas, la lucha por la vida se encargó de ello: una araña *Trigonotarbida*, tras una espera paciente, acababa de enrollar en sus sedas a un pequeño insecto *Rhyniella*. Debía alimentar a sus crías y no temía a nadie en tierra. Pero no sabía que también su época de dominio tenía los días contados...

Aunque las aventuras de los insectos es otra historia. Y la vamos a contar en el capítulo siguiente, en la que también nos adentraremos en la vida de uno de sus principales predadores y actores del Devónico: los peces.

31. El devónico: la edad de los peces

En el capítulo anterior nos adentramos en el Devónico, periodo que duró desde hace 416 a 359 millones de años. Hablamos sucintamente sobre su geografía, geología y climatología, marco en donde se desplegó la evolución de las plantas que conquistaron definitivamente las alturas gracias a innumerables nuevas tretas y estrategias. Vimos que les acompañaban los hongos, que ya por entonces practicaban los métodos actuales de interrelación con ellas.

En el capítulo que iniciamos vamos a continuar con la biota de este periodo geológico adentrándonos en el mundo de los animales. Nos asomaremos también a lo que sabemos de los insectos del Devónico, así como en la intensa historia evolutiva de los peces.

Al igual que sucedió con la colonización de las plantas, en un principio la tierra firme supuso una doble oportunidad para los pequeños artrópodos marinos. Huyendo de la predación brutal que dominaba las aguas del mar, habían migrado ya a zonas de aguas poco profundas y charcas, remontando posiblemente ríos y torrentes. El huir hacia la tierra suponía poder huir de aquellas amenazas. Por otro lado, ya hemos hablado en el capítulo anterior de la cantidad de desechos vegetales que se generarían en los bosques del Devónico, que podían ser aprovechados por los pequeños animales detritívoros como los milpiés, sus primos los gigantes *Arthropleura*, los ácaros y los hexápodos colémbolos. La tierra era un gran almacén de comida para el primero que llegara. Y así no fue difícil que la migración de los artrópodos prosperara. ¿Cuándo se debió producir?

Al dejar hace dos entradas al periodo Silúrico ya teníamos la intuición de que en aquel momento algún artrópodo había empezado ya a abandonar el agua. Sin embargo, los primeros datos fósiles que permiten asegurar esta realidad provienen de un yacimiento paleontológico datado en hace aproximadamente 410 millones de años, localizado en el yacimiento de Rhynie Chert, en los alrededores de la ciudad escocesa del mismo nombre. Hablábamos de él en el anterior capítulo al estudiar los fósiles de hongos. En dicha formación aparecen artrópodos terrestres que incluyen escorpiones, pseudoescorpiones, ácaros e insectos con alas, los cuales

debieron evolucionar independientemente unos de otros hacia sistemas de respiración aérea.



Fósiles conservados en ámbar de Rhyniella y de Rhyniognatha (fossilmuseum.net y evolution-textbook.org)

En el yacimiento escocés destacan los fósiles de los primeros hexápodos conocidos en tierra firme, el colémbolo *Rhyniella praecursor* y el insecto *Rhyniognatha hirsti*. Datan de principios del período Devónico, hace entre 411 y 407 millones de años, aunque es probable que aparecieran antes, a finales del Silúrico.

En el primero de ellos ya se encuentran definidas las estructuras de todos los insectos: cuerpo dividido en cabeza, tórax y abdomen, tres pares de patas y un par de antenas. Del segundo sólo se han encontrado los restos de sus mandíbulas que sugieren que pertenecían a un insecto alado, con lo que el origen del vuelo de los insectos habría ocurrido al menos 80 millones de años antes de lo que se pensaba, ya que los primeros fósiles de alas de insectos datan de finales del Carbonífero.

Si seguimos ahora la pista de los **arácnidos** encontramos que los más ancestrales provenían ya del Silúrico y fueron los del orden *Trigonotarbida*. Realmente eran unos pseudoarácnidos de una rama lateral, sin representantes en la actualidad. Tenían ya ocho patas, y pulmones en libro, pero no fabricaban seda. Las arañas propiamente dichas evolucionaron un poco más tarde, hace aproximadamente 400 millones de años, en pleno Devónico. Tenían segmentación abdominal y órganos que secretaban seda. El fósil más antiguo encontrado de una especie de estas

características data de hace 380 millones de años y se conoce como *Attercopus fimbriungus*.



Fósiles de arácnidos del Devónico, el trigonotárbida Kreischeria y Attercopus fimbriungus (Wikimedia, CC BY 2.0 y Smithsonian.com, fair use)

Dentro de la clase de los arácnidos se encuentran también los escorpiones, primos de las arañas. Sabemos que en el Silúrico eran animales marinos que respiraban por branquias y debían estar adaptados a condiciones costeras. En el Devónico dieron también el salto a tierra firme, desarrollando también unos pulmones en libro y una débil coraza quitinosa. Por desgracia, muy raramente dejaron restos fósiles, por lo que se sabe muy poco de su evolución. Para ello habrá que esperar al Carbonífero.

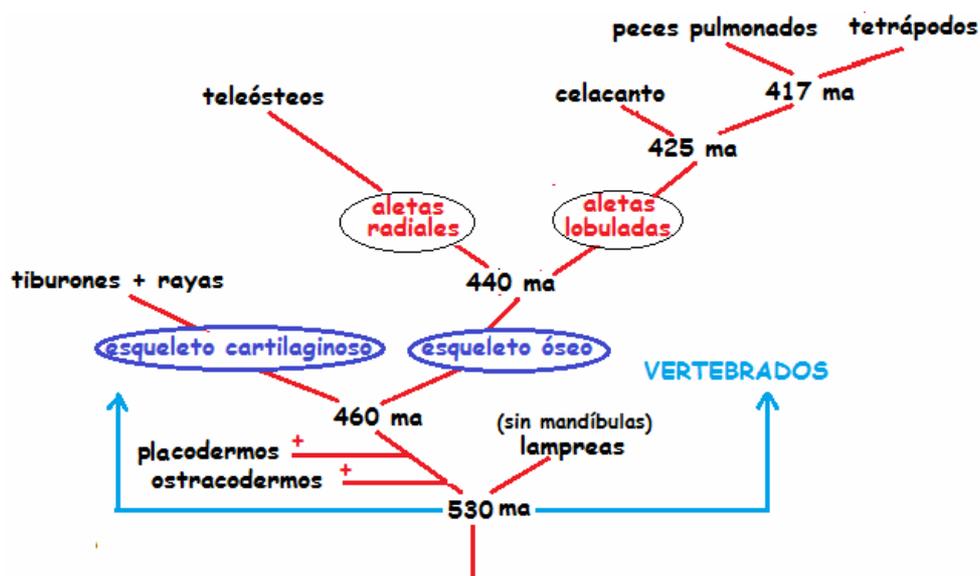
Pero resultó que en nuestra historia el éxodo de la Vida hacia nuevas oportunidades no acabó con la aventura migratoria de los artrópodos. También los peces encontraron motivaciones muy parecidas. Las aguas del Devónico eran aguas de predación y supervivencia, y la tierra estaba llena de oportunidades, repleta de succulentas plantas, nutritivos insectos y abundancia del supereficaz oxígeno. Aunque antes tuvieron, eso sí, que pasar por una serie de múltiples conquistas.

El preámbulo empezó en el mar de la Edad de los Peces

Los mares del Devónico eran muy semejantes a los del Silúrico, las aguas poco profundas seguían favoreciendo el desarrollo de los arrecifes en donde corales, algas y esponjas colaboraban con precisión. La pequeña vida marina se encontraba segura en estos medios, y por eso proliferó

durante el Devónico. Los moluscos bivalvos se extendieron hacia aguas dulces, mientras los cefalópodos se decantaban hacia formas de caracol, tipo amonites, abandonando las formas rectas tipo ortocono. Entre los artrópodos, los trilobites parecían perder su carrera armamentística, lo que hizo disminuir mucho a sus poblaciones en contraste con lo que les pasaba a los escorpiones marinos, causantes en parte de la fatalidad de los trilobites.

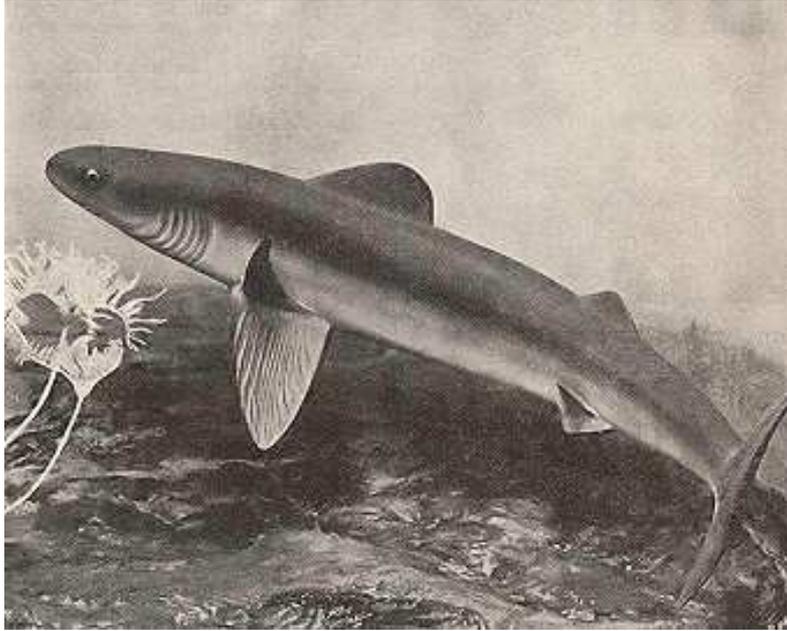
Pero el gran cambio se dio en los animales cordados nadadores, entre los cuales aparecieron nuevos fenotipos, todos ellos predadores. Es el periodo de la expansión de los peces, y no sólo por sus nuevas formas, sino también porque por primera vez remontaron las corrientes fluviales y se establecieron en lagos y ríos. El cambio del agua salada a dulce debió ser tan arduo como el que habían experimentado antes las plantas al colonizar la tierra. Se debieron utilizar trucos parecidos, como endurecer el epitelio externo con escamas y pieles más impermeables.



Diversificación de los peces durante el Silúrico y Devónico

En la figura anterior se ve el árbol filogenético correspondiente a los peces durante la edad en que se inició su gran diversificación y expansión. Las fechas corresponden al comienzo de la ramificación inicial del grupo, no hay que confundirlas con la época en que los especímenes se habrían ya consolidado, y por tanto no coinciden las fechas con las de las edades geológicas del Silúrico y Devónico.

Del Silúrico venían los ostracodermos, peces sin mandíbulas, los falsos tiburones ya con mandíbula y los primeros placodermos.



Cladoselache (Wikimedia, dominio público)

Estos peces debían tener un esqueleto cartilaginoso, a pesar de las duras placas que cubrían sus cuerpos. Este tipo de material, el cartílago, debió aparecer por primera vez como elemento estructural del esqueleto hace unos 400 millones de años, con la aparición de los peces condríctios, que literalmente quiere decir precisamente eso, “pez cartilaginoso”. Los actuales descendientes de aquellos peces son los tiburones y rayas y, como ellos, sus tatarabuelos eran consumados predadores. Los fósiles más primitivos que se conocen corresponden al género *Cladoselache*.



Placas y dientes del Dunkleosteus (Wikimedia, dominio público)

Los ostracodermos fueron desapareciendo a lo largo del Ordovícico. Lo mismo le sucedió a los placodermos. Entre los más conocidos de estos últimos está el *Dunkleosteus*, de finales del periodo. Se caracterizaba por una cabeza acorazada, con placas de cinco centímetros de grosor, provista de mandíbulas con cuchillas dentales poco usuales. Aunque otros placodermos rivalizaban con él en tamaño, *Dunkleosteus* es considerado uno de los depredadores marinos más fieros y mortales que hayan existido. Con seis metros de largo y una tonelada de peso, este cazador estuvo en la cúspide de la cadena alimentaria y probablemente depredaba toda clase de fauna.

Algunas investigaciones⁽⁴⁹⁾ han verificado un inesperado detalle de los placodermos: algunos especímenes copulaban y las madres desarrollaban los embriones en su interior, lo cual es un antecedente clarísimo de las estrategias reproductivas de los actuales tiburones, rayas, celacantos y algún que otro teleósteo. Un grupo dirigido por el paleontólogo australiano John A. Long, encontraron dos embriones de peces artrodiros, el grupo más diverso de los placodermos, con más de 200 especies, en el interior de especímenes fosilizados de 380 millones de años de antigüedad. Era la primera evidencia clara de reproducción mediante fertilización interna en este grupo tan diverso. Una de las características más curiosas del fósil es que en su interior encontraron un embrión fosilizado de placodermo unido a su madre por un cordón umbilical. Hasta entonces se creía que las criaturas de ese período se reproducían de forma ovípara, mediante la fertilización de las huevas fuera del cuerpo de la hembra. Pero aún había más. Long y su equipo encontraron en los fósiles estudiados estructuras en la aleta pélvica indicativas de que los placodermos se apareaban mediante unos lóbulos situados en la aleta del macho, incipientes penes parecidos a los de los tiburones modernos.

Dejemos a los **elasmobránquios**, los peces cartilaginosos, y sus costumbres. Sus antepasados continuaron el camino sin percatarse de que en un momento dado, hace unos 460 millones de años, algo estaba revolucionando el mundo de los materiales estructurales orgánicos. Un ancestro suyo, probablemente un pequeño pez con pinta de tiburón y mandíbulas, tuvo una “enfermedad”: se le osificaban los cartílagos. El error no fue anulado por la naturaleza, puesto que debió tener una influencia neutral en sus poseedores. Al menos daba las mismas oportunidades que el tener un esqueleto dúctil y blando: la misma potencia natatoria, la misma agilidad, la misma capacidad de ir a por las presas. Serán a partir de este momento los **osteictios**.

En 2014 se publicó⁽⁵⁰⁾ el resultado de un estudio genómico sobre el pez *Callorhynchus milii*, el “tiburón elefante” al que se le considera un fósil viviente, aún más que el celacanto, por el que se han podido determinar los genes que provocaron tal digresión evolutiva, pasar de cartílago a tejido óseo.

Con los osteictios radió del árbol común la rama de los peces óseos que con el tiempo fueron especializando sus apéndices. Unos siguieron con la idea de aletas con *radios* livianos, cada uno de ellos una fina barra cartilaginosa u ósea, perfeccionándolas y motorizándolas con músculos en el interior del cuerpo: un gran avance tecnológico que dio luz a los *actinopterigios*, los “aletas de radios”. Otros, los sarcopterigios o “aletas de carne”, las deformaron como una especie de “brazos” carnosos, *lobulados*, motorizados por músculos internos de los lóbulos que estaban engarzados alrededor de un “hueso” central. Los peces con aletas radiales posteriormente formaron la gran familia de los teleósteos, compuesta por la mayoría de los peces actuales, mientras que los peces con aletas lobuladas darán paso a los celacantos, a los peces pulmonado... y a los anfibios.



Ejemplos de aletas, arriba, lobulada, de un pez sarcopterigio y abajo, radial, de un ciprínido (Wikimedia, GNU FDL 1.2, y CC BY-SA 2.5)

Las aletas eran los controles de su movimiento por el agua. Cada una de ellas estaba especializada según fuera la función que desarrollaba en el complejo sistema de equilibrio y dirección natatorio. La *aleta dorsal* les mantenían verticales, el ***par de aletas ventrales*** y la *anal* estabilizaban su movimiento. El impulso y dirección lo ejercían con el fuerte penduleo horizontal de la *aleta caudal* y el freno mediante el ***par de aletas pectorales*** junto a las aberturas branquiales. En el anterior texto se ha resaltado con negritas las aletas pares que en el futuro se transformarán en las cuatro extremidades de los tetrápodos. Somos cuadrúpedos gracias a una solución de estabilidad hidrodinámica, ¿quién lo diría? Pero esto es otra historia diferente a la de la navegabilidad de los peces. Esta navegabilidad se refinó mediante un nuevo órgano especial.

La mayoría de los peces con esqueleto óseo poseían ya *vejiga natatoria* lo que les daba una gran versatilidad a la hora de nadar. Los tiburones, al contrario, como no la tienen, no pueden dejar de nadar para no caer a las profundidades, en una continua corrección contra la fuerza de la gravedad. De ahí que lo compensen con una gran agilidad y fuerza en sus movimientos.

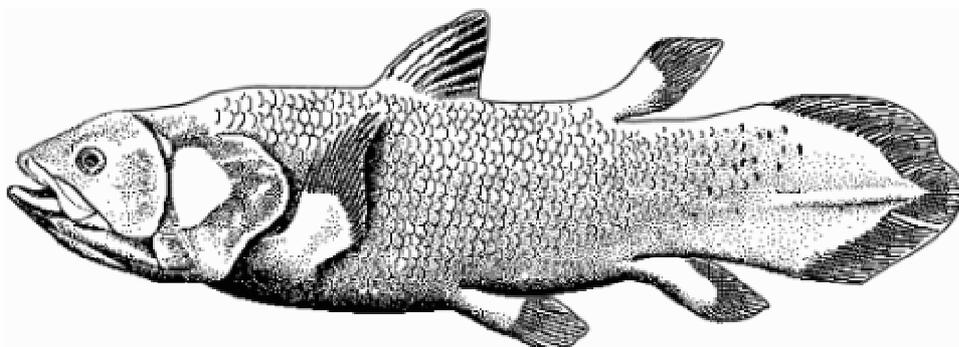
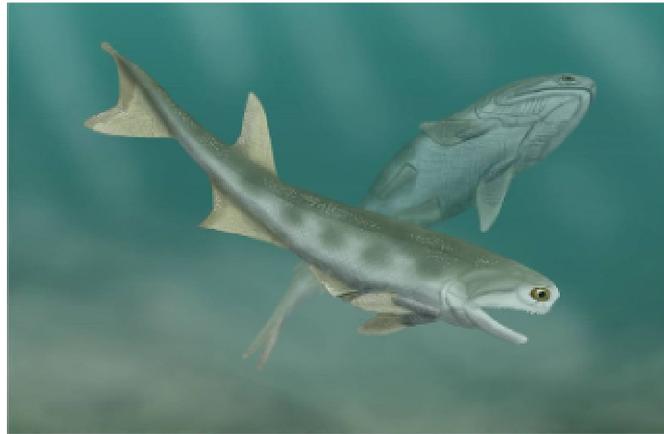
La vejiga natatoria es un saco lleno de gas, que se forma en estado embrionario, con el que los peces óseos controlan la flotabilidad mediante un complejo sistema de intercambio gaseoso con la sangre, y permite al pez ascender, descender o permanecer a un nivel estable en el agua sin necesidad de utilizar la musculatura.

Su origen está en la evolución de un saco ciego de la faringe en donde posiblemente almacenaba aire absorbido por la boca para complementar el intercambio branquial de oxígeno. Aunque parezca algo contrario a lo esperado, de la vejiga natatoria no derivaron más tarde los pulmones. Para decir eso nos apoyamos en el desarrollo embrionario de los actuales peces pulmonados. Puede observarse que sus pulmones funcionales son una derivación de la pared ventral del final de la faringe, mientras que el saco ciego del que deriva la vejiga natatoria es una extensión de la pared dorsal.

De esta época es el fósil de un pez de aletas lobuladas, *Kenichthys campbelli*, de 395 millones de años de antigüedad, descubierto en la provincia china de Yuan. Presenta unos conductos nasales que se abren en la bóveda de la boca en mitad del arco de sus dientes superiores, casi como si tuviera un paladar partido. Se habían formado por migración de los nostriles posteriores -unos orificios junto a los ojos- inicialmente externos, hacia el interior de la boca: es la evidencia del primer paso para la

formación de unos conductos nasales separados del tubo digestivo que tan buena ayuda supondrá a los vertebrados en el nuevo mundo terrestre aún no conquistado, ya que gracias a ellos podían “tragar” oxígeno en una posición de aguas someras sin necesidad de que su cuerpo sobresaliera mucho del agua.

Nos hemos adelantado demasiado hablando de los peces pulmonados, así que retomaremos el sendero siguiendo la pista de los peces con esqueleto óseo. Entre los más antiguos del tipo de aletas radiales se encuentra el *Cheirolepis*, que fue un predador de agua dulce de unos 55 centímetros de longitud. Más tarde evolucionaron los peces de aletas lobuladas, primero los *celacantos* que sobreviven a día de hoy, y con posterioridad los *peces pulmonados*. El éxito de estos últimos se debe a su capacidad para retener aire en los pulmones en los períodos de desecación ambiental, moldeados por la selección natural en sus hábitats preferidos, las acumulaciones de agua dulce superficiales. Los celacantos, por el contrario, optaron por las profundidades de los océanos.



Arriba imagen artística del pez de aletas radiadas Cheirolepis y abajo celacanto Latimeria Chalumnae (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unporte y GNU FDL 1.2)

Con todas las armas para el asalto terrestre

Con los peces pulmonados de aletas lobuladas hemos llegado al último diseño que se necesitó para que estos animales pudieran aventurarse con garantías mínimas fuera del agua. La aventura de los artrópodos había sido difícil: las patas articuladas, el aligeramiento de sus caparazones, el paso de la respiración branquial a la pulmonar... pero nada comparado con la complicada vía de los vertebrados hacia la protectora tierra, hacia un mundo aéreo lleno de oxígeno y oportunidades. Sólo había que aprender.

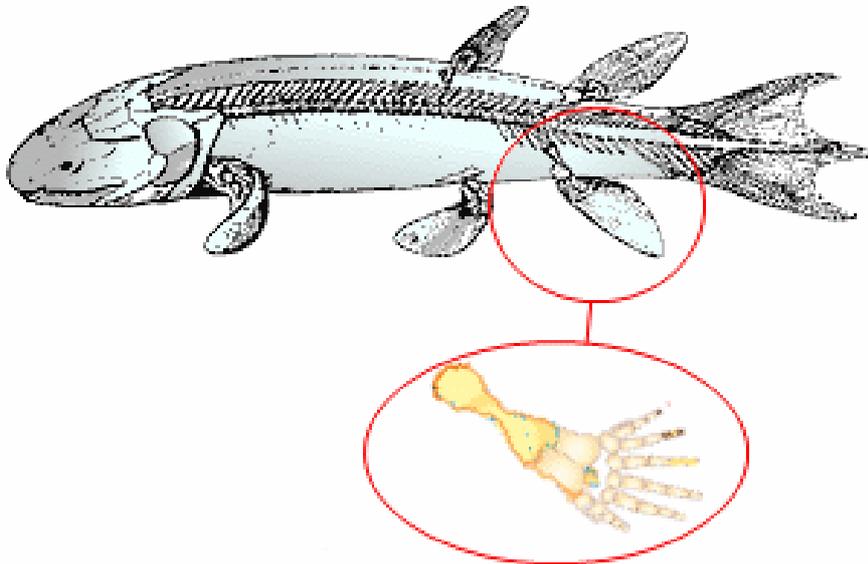
Y no eran pocas las dificultades. Había que aprender a andar con unas patas inventadas; había que aprender a respirar directamente el oxígeno atmosférico; había que luchar contra la gravedad, antes casi imperceptible en la ingravidez “arquimedea” de las aguas, fortaleciendo el esqueleto; había que conseguir, por meros motivos de supervivencia, un cuello flexible que permitiera levantar la cabeza y asomar sólo los ojos por encima de la protectora lámina de agua; había que cambiar la flexibilidad corporal y pasar de un bandeo lateral como lo hacían los peces a un bandeo arriba/abajo; había que fortalecer la piel que ya nunca más estaría permanentemente lubricada por el agua, al igual que sus huevos, que deberían aguantar la sequedad de tierra firme. Todo ello, si querían realmente colonizar el nuevo mundo.

Impresionante. De todo ello disfrutaremos en el capítulo siguiente.

32. El devónico: los tetrápodos conquistan la tierra

En los dos capítulos anteriores estuvimos desgranando algunos aspectos de lo que ocurrió en el Devónico: su geología y climatología, así como la historia de sus habitantes, hasta ahora las plantas, hongos, artrópodos y peces. Hoy toca completar la saga hablando de cómo alguno de estos últimos desarrollaron las habilidades necesarias como para poder salir a tierra en busca del abundante alimento que allí se encontraba, así como de la protección proporcionada por la ya desarrollada vegetación.

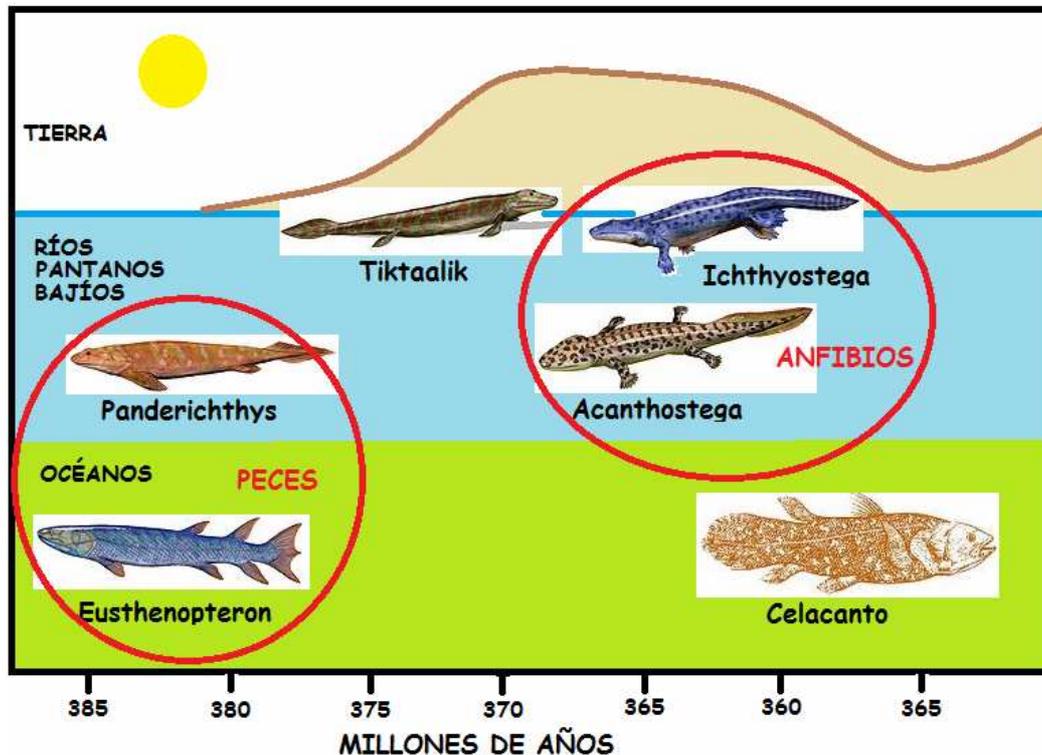
Es en el Devónico más tardío cuando comienza un interesante rosario de diversificación de las especies de vertebrados a partir de los peces de aletas lobuladas pelágicos como el *Eusthenopteron*, que los sacó fuera del agua inaugurando la familia de los primeros anfibios. En este pez ya encontramos en sus aletas una estructura de huesos comparable a la de húmero/cúbito-radio más fémur/tibia-peroné de los futuros tetrápodos.



Esqueleto y aleta pectoral del Eusthenopteron (a partir de Wikimedia, dominio público)

La figura siguiente muestra la secuencia de adaptaciones: *Panderichthys*, aún un pez, que coloniza bajíos fangosos. *Tiktaalik*, otro pez pero con

muchas características de los tetrápodos. Tenía aletas semejantes a patas con las que se arrastraba hasta tierra. A partir de él aparecen los primeros tetrápodos en ciénagas con mucha vegetación: *Acanthostega* e *Ichthyostega* con ocho y siete dedos en cada pata, respectivamente.



(A partir de imágenes de Wikimedia GNU FDL 1.2)

Por su especial importancia como individuo bisagra hablaremos un poco del *Tiktaalik*. Quiere decir “pez de aguas someras” en el idioma de los inuktitut que viven en el Ártico canadiense donde se encontraron sus fósiles. Tengo que recomendar por su amenidad e interés la lectura del libro “*Your inner fish*” escrito por uno de sus descubridores, Neil Shubin, que describe la apasionante aventura que vivió para encontrar por primera vez un fósil de este animal.

El *Tiktaalik* vivió hace aproximadamente 375 millones de años. Del análisis de las rocas donde se han encontrado los fósiles se sabe que habitaba zonas pantanosas en los deltas de los ríos, lugares que se inundaban periódicamente siguiendo los ciclos estacionales, lo que le obligaba a ser un experto en el desplazamiento tanto en agua como en seco. En estas zonas tropicales la vegetación era abundante e intrincada, por lo que no sólo debía dominar la natación, sino también el movimiento por un terreno enmarañado. Su organismo estaba precisamente adaptado a estas necesidades. Su mezcla de características de pez y tetrápodo condujo a sus

descubridores a caracterizar a *Tiktaalik* como un “peztrápodo”. Técnicamente es un pez de aletas lobuladas que disponía de una mandíbula primitiva, escamas y una estructura ósea que indica que tenía branquias para respirar. Pero había desarrollado unos cambios morfológicos que lo emparentaban con los posteriores tetrápodos, como así lo demostraba la posición de los ojos en la parte superior de la cabeza que indica que pasaba gran parte de su vida en el fondo del agua mirando desde una posición superior, al igual que lo hace actualmente un cocodrilo. Tenía un cuello móvil en consonancia con lo anterior mientras que la estructura de las costillas se parece a la de los primeros anfibios. Tenía también pulmones para las épocas de sequía, que los llenaba de aire tragándolo por la boca. Además, había desarrollado en su cráneo una incipiente zona auditiva.

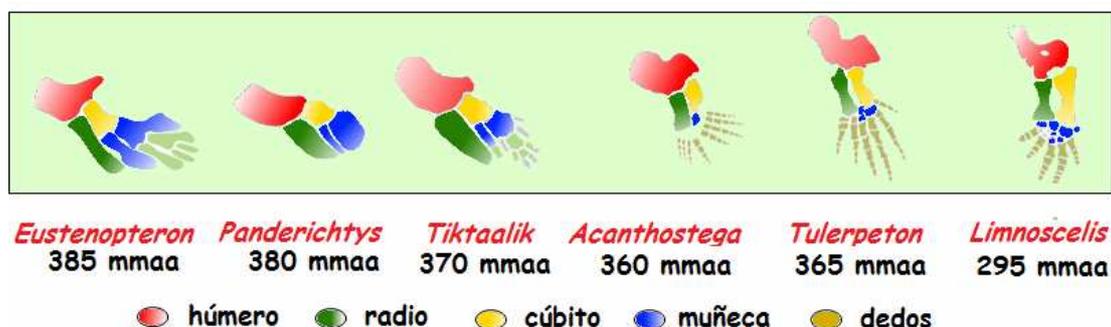


Fósil de Tiktaalik (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Lo que más llama la atención son las aletas, que eran medio de pez, medio extremidad de tetrápodo. Estas aletas tenían un apéndice central compuesto de huesos y músculos suficientemente potentes como para poder soportar el peso de su cuerpo contra la fuerza de la gravedad, ya fuera en aguas someras o en tierra. La mayoría de las articulaciones de las aletas eran funcionales, flexionaban. Tenía hombros, codos y hasta unas partes de la muñeca que actuaban de una manera parecida a las de los primeros animales terrestres. Los huesos más distantes de la muñeca parecen ya dedos primitivos, como los que tienen los anfibios.

En la figura siguiente vemos cómo durante la evolución de la estructura de las extremidades hacia las de los tetrápodos van apareciendo tras el húmero un par de huesos con una articulación entre ambos niveles, sobre los que más tarde se organiza mediante una serie de huesecillos una nueva

articulación, la muñeca, que permitiría a los dedos una mayor operatividad. El *Acanthostega* tenía ocho dedos, resto de una estructura de cuatro dobles encontrada en fósiles anteriores al *Eustenopteron*.



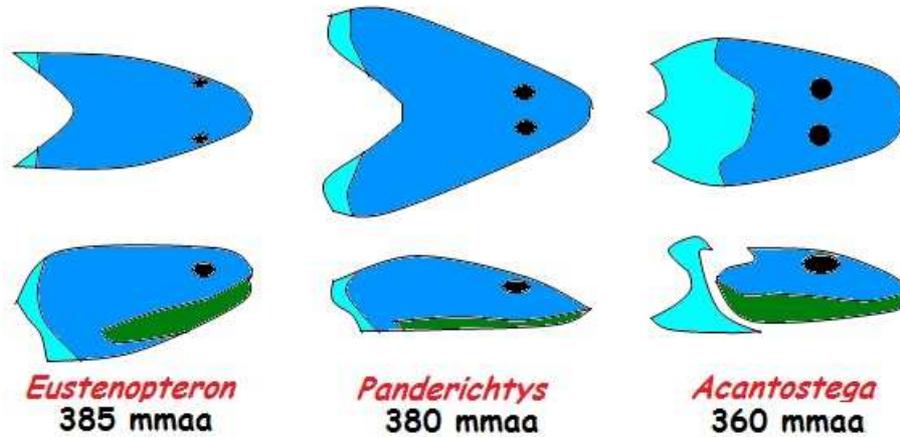
Evolución de aletas de pez a extremidades de tetráodos

La transición de aletas a patas fue acompañada por un reforzamiento de la estructura de soporte del peso, apareciendo los huesos de los hombros y las caderas, una mayor y más sólida superficie de entronque de los músculos, así como una orientación más lateral de las articulaciones iniciales de cada extremidad en el esquema corporal. Realmente se consiguió una estructura semejante a un puente colgante, la columna vertebral, soportado por cuatro pilares firmemente asentados en un esqueleto modificado, en el que las aletas pectorales pasaron de estar afianzadas en el cráneo a serlo en una caja torácica reforzada, mientras que las aletas pélvicas, independientes en los peces, se sujetaron a una nueva estructura, el conjunto de los nuevos huesos pélvicos.

Estas modificaciones permitieron a los animales que habitaban aguas poco profundas el apoyarse para asomar la cabeza, el protegerse con “costillas” y permitir una mejor expansión de sus incipientes pulmones al ir más erguidos, así como el dominar nuevas habilidades en la motilidad con unas patas delanteras directoras y unas traseras motoras.

La estructura de la cabeza acompañó a las modificaciones de las extremidades. A medida que se iba evolucionando hacia los tetráodos, los cráneos se fueron ensanchando y aplanando, pasaron de posición vertical y movimiento derecha-izquierda tipo pez, a horizontal y movimiento arriba-abajo. Los ojos se desplazaron hacia atrás y arriba, lo que dejó un “hocico” más largo que reforzaba la capacidad respiratoria de la boca y permitía ver afuera del agua desde una posición de inmersión. Los huesos del cráneo se fueron soldando, lo que dio mayor rigidez y por tanto la posibilidad de un más fuerte agarre de la palanca mandibular a la hora de morder. Aparece el paladar, lo que como dijimos permitió separar la masticación de la

respiración. El último hueso de la cabeza quedó libre al desaparecer el inmediatamente anterior, lo que permitió un “cuello” y una mayor independencia en la movilidad de la cabeza.



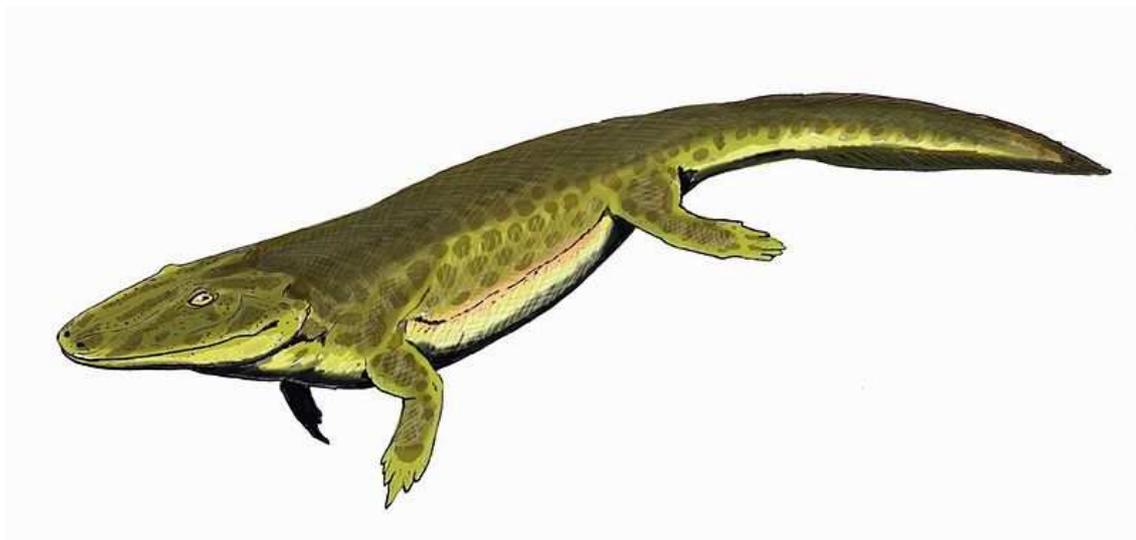
Evolución de la cabeza de los peces durante el proceso de salida del medio acuático

Una vez conocido su camino evolutivo, la cuestión es: ¿por qué estos peces sarcopterigios dejaron el medio acuoso?

Hay una teoría muy extendida que intenta explicar que los peces dejaron el agua por necesidades vitales. Se estableció un periodo de sequías que hizo disminuir en gran medida sus hábitats, por lo que los individuos que mudaron y se adaptaron fueron los que pudieron sobrevivir. Sin embargo esta teoría no está muy bien soportada, pues no hay pruebas de esas sequías en los momentos geológicos en que estos animales abandonaban las aguas, ni se cree que esta causa por sí sola pudiera generar tantos cambios evolutivos. Hoy en día se apuesta más por el estímulo que supondrían las oportunidades que ofrecía la tierra firme.

El ambiente acuático era estresante, estaba superpoblado y presentaba toda clase de peligros, mientras que el terrestre era mucho más seguro, estaba casi despoblado y los recursos eran prácticamente infinitos, dispuestos a ser utilizados por el primero que llegase, sin ninguna competencia. Sabemos que en aquel tiempo había ya muchos invertebrados que se arrastraban por tierra y agua, principalmente en el suelo húmedo, algo más que suficiente para ofrecer a los nuevos colonizadores que lo intentaran oportunidades para alimentarse. Algunos de estos invertebrados eran lo bastante grandes como para alimentarse de tetrápodos pequeños, convirtiéndose en un potencial peligro. Pero a pesar de ello el medio

terrestre era un lugar mucho más seguro y ofrecía más que las aguas cenagosas. Las coberturas vegetales y boscosas prestaban ayuda al mimetismo y disimulo. Durante las estaciones secas las transformadas aletas les servirían para desplazarse de charca en charca a medida que se fueran desecando, o incluso en casos extremos podrían reducir su metabolismo y aletargarse enterrados en el barro, como lo hacen sus actuales primos los peces pulmonados de África y Sudamérica.



El tetrápodo devónico Tulerperon en su camino de conquista de tierra firme (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Una tercera teoría se basa en los siguientes datos: Durante la época anterior a que aparecieran fósiles de transición de peces a tetrápodos se constata una disminución del nivel de O₂ atmosférico, a la par de que se gozaba de un clima templado que favorecía la proliferación de las plantas, las cuales iban creciendo en tamaño. Por otro lado, del estudio de la secuencia de evolución de estos fósiles se observa que los orificios nasales posteriores se van agrandando, así como el hueso hioideo por debajo del cuello, que recordemos provenía del segundo arco branquial. También se observa un sucesivo fortalecimiento del esqueleto del par de patas/aletas anteriores. De esos datos se razona el siguiente escenario:

Los prototetrápodos, como el *Tiktaalik*, vivían en aguas costeras o estanques cenagosos rodeados de una espléndida vegetación. De esta vegetación caerían troncos y restos que colmatarían estos estanques, llenándolos de nutrientes que empobrecerían de oxígeno a sus aguas. Parece como si la falta de oxígeno en sus branquias les obligara a suplementar sus necesidades de este elemento captándolo directamente con

la boca fuera del agua, como lo hacen muchos de los peces actuales. Pero se encontraron con que el nivel atmosférico de este gas no era elevado. Las modificaciones genéticas especializarían a algunos para levantar mejor la cabeza y “respirar” más aire, las fosas olfatorias se fueron deformando, alargándolas hacia atrás hasta que sus aberturas posteriores, que hasta entonces eran externas, conectaron con la faringe, permitiéndoles también tomar aire a través de las fosas olfativas. *Kenichthys* es un espécimen de hace 400 millones de años que tenía ya los dos tipos de orificios. Los que consiguieron extremidades delanteras más fuertes podían mantener más tiempo la cabeza fuera o incluso hacerlo desde aguas ligeramente profundas. A la par se iría desarrollando la bolsa ciega en la base de la faringe que se fue especializando en la absorción de oxígeno, lo que llegaría a convertirla con el tiempo en pulmones. Estas armas les permitieron aprovechar las oportunidades del nuevo entorno. Éste pudo ser el proceso por el que los vertebrados pasaron del mar a la tierra.

La transición desde el agua al mundo nuevo de la tierra fue casi sin duda un ejemplo de “*radiación adaptativa*”, una rápida apertura de un abanico de nueva vida. Un resquicio por el que se abrió un mundo virgen a los nuevos pioneros, en el que penetraron gracias a sibilinas evoluciones genéticas. No encuentran competencia, y hay alimento y protección de sobras. La reproducción es fácil y la siguiente generación, que ha recibido los nuevos genes de sus padres, es estable y con una mayor capacidad de penetración. Y pasarán de generación en generación afianzándose en poco tiempo los nuevos rasgos en toda la población. Así pudieron surgir nuevas especies con relativa rapidez, así comenzó el éxito de los tetrápodos.

Extinción masiva del Devónico

Pero la vida no siempre fue fácil. Al final del Devónico, hace entre 408 y 360 millones de años, se dieron una serie de importantes extinciones de especies a las que se le ha dado el nombre genérico de “*extinción masiva del Devónico*”, la segunda gran extinción del Fanerozoico. De hecho, parece tratarse de tres extinciones masivas a lo largo de un periodo de tres millones de años. Los organismos que se vieron más afectados por esta crisis biótica fueron los que habitaban zonas marinas templadas. Por ejemplo, los corales que habían dominado el período vieron mermada su población y hasta el Triásico, 150 millones de años más tarde, no volvieron a tener una presencia importante los arrecifes coralinos. Aproximadamente el 83% de las especies se extinguieron.

Existen también evidencias de una importante era glaciaria en Sudamérica, que en aquel momento ocupaba latitudes polares, originada probablemente por la enorme difusión vegetal del Devónico. Las plantas habrían fijado el dióxido de carbono, reduciendo el efecto invernadero que produce este gas contribuyendo así a un enfriamiento global. Aunque se sospecha de esta causa como la principal, no se excluye la influencia de un impacto extraterrestre, para el que se han propuesto varios posibles lugares de colisión.

Nos disponemos a dejar el Devónico con un regusto amargo por este final de extinción. Este periodo rico en anécdotas trascendentales, cuando la tierra fue colonizada no sólo por las plantas, sino también por los insectos, arácnidos y tetrápodos. El periodo en que los peces descubrieron la variedad que en líneas generales no ha cambiado hasta hoy. A partir de entonces el paisaje en tierra ya no fue igual.



Representación ideal de un paisaje devónico (Wikimedia, dominio público)

La figura anterior no difiere de lo que podemos encontrar en nuestra naturaleza actual. La luz pone calidez a la imagen de este atardecer de lo que sabemos un templado periodo. Los mares crecidos construían largas extensiones de aguas someras, en donde la vida bullía. En el bosque, los licopodios, equisetos y helechos daban amparo a una fauna de suculentos

artrópodos. Las tranquilas aguas parecen esconder, tensas, un primigenio tetrápodo al acecho. Tengo que reconocer que la imagen me sobrecoge el ánimo al pensar que esto pudo ocurrir, tal cual lo veo, hace “tan sólo” unos 400 millones de años, cuando los años duraban la eternidad de cuatrocientos días.

Ahora debemos abandonar aquellos tiempos olvidando el regusto amargo de las extinciones finales, con la sensación relajante que da el contemplar una Tierra ya familiar, consecuencia de tantas migraciones exitosas. Continuemos atentos ante el esplendor que viene: el ciclópeo Carbonífero.

33. Entramos en el Carbonífero

En el capítulo anterior presenciábamos los esfuerzos de los peces pulmonados por asomar las narices fuera del agua en su afán de aprovechar las oportunidades que presentían existían en el nuevo entorno. Eso sucedía hace unos 380 millones de años. En este capítulo y los dos siguientes vamos a realizar un paseo que nos va a llevar hasta el momento en que consiguen el éxito, cuando anfibios y reptiles prosperarán definitivamente en tierra firme. Lo primero que precisamos es contextualizar los acontecimientos y, como hemos hecho al analizar otros periodos, empezamos con el escenario: la geología, el medio ambiente climático y la biosfera vegetal.



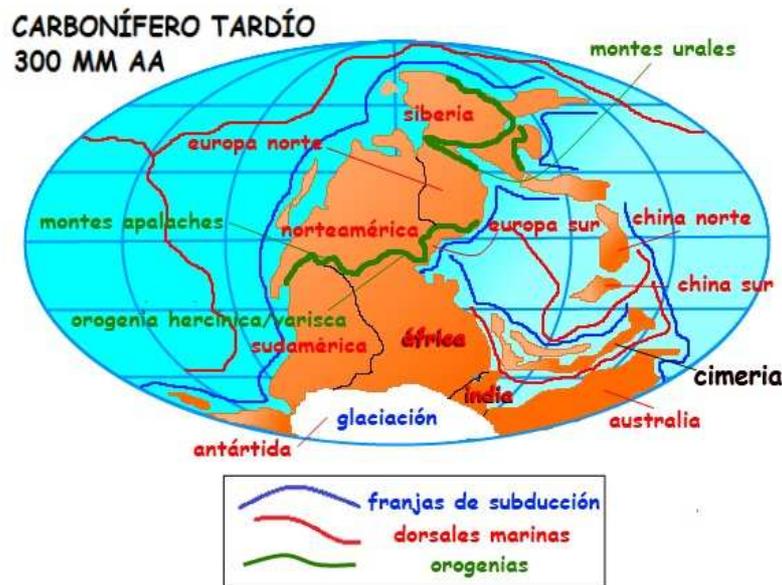
Damos, pues, un paso cronológico más para adentrarnos en el siguiente periodo, conocido como Carbonífero, que se extendió a lo largo de 60 millones de años, desde 359 hasta 299 millones antes de hoy.

Su nombre tiene raíces del latín y significa “llevar carbón” como reflejo de los grandes depósitos de procedencia vegetal de este mineral que se generaron en esta época. La abundancia de la vegetación provocó el incremento del oxígeno atmosférico, que llegó a los niveles históricos más altos conocidos. Aparecieron las coníferas mientras los insectos inventaban el vuelo a la vez que los reptiles asomaron definitivamente la nariz fuera del agua con su huevo amniótico.

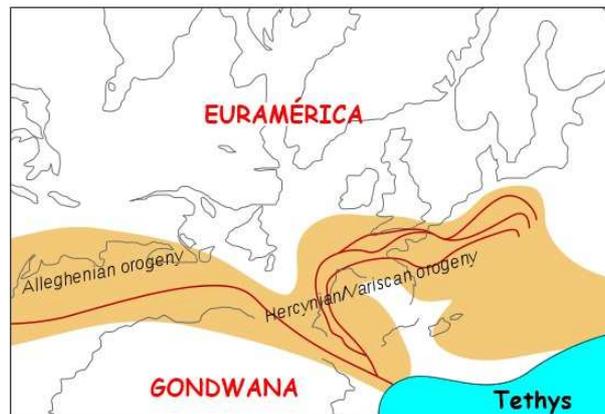
El mapa que sigue corresponde al periodo más tardío del Carbonífero, cuando estaba a punto de consolidarse Pangea.

Recordemos que salíamos del Devónico con el gran continente Gondwana en posición austral, acabando el último periodo glacial que había cubierto

con un sólido manto gélido su polo sur. Por encima de él, dos continentes, Siberia y Euramérica, en posiciones ecuatoriales.



La deriva de estas tres masas de tierra las iba aproximando entre sí, creando unas franjas de colisión que desarrollaron fuertes orogenias. De la unión entre Siberia y Euramérica se creó el continente Laurasia y aparecieron los montes Urales, entre otros. Y al sur, en la zona de subducción entre Euramérica y Gondwana, se desarrollaron las orogenias Hercínica/Varisca en Europa y la Alegeniana en Norteamérica.



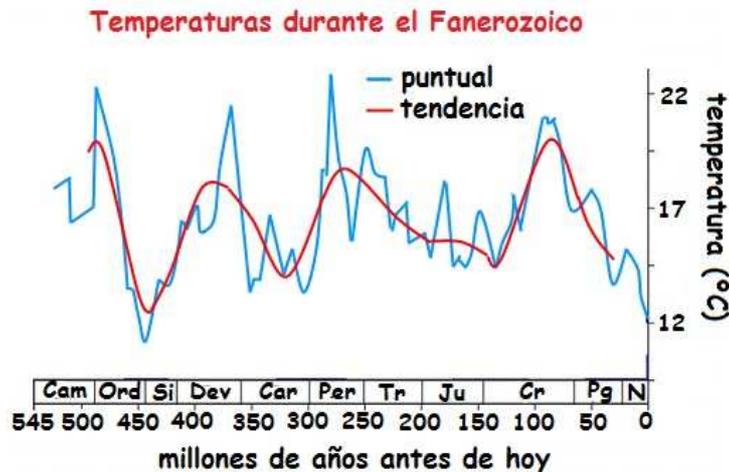
Orogenias Alegeniana y Hercínica/Varisca. En traza negra los perfiles de los actuales continentes (Wikimedia, CC BY-SA 1.0)

La primera produjo, entre otros, una serie de importantes afloramientos de granitos en la península Ibérica, formando las cordilleras centrales y el macizo gallego. La Alegeniana añadió una cola suroeste a los montes

Apalaches americanos que habían surgido en el Ordovícico en la unión de Avalonia, Báltica y Laurentia.

Por oriente quedaban descolgados, cerrando el mar de Tethys, dos pequeños cratones que conformarían más tarde China, norte y sur.

La primera parte del periodo fue en gran medida cálida, aunque progresivamente se fue implantando un enfriamiento que desembocó en una fuerte y duradera glaciación sobre el polo sur de Gondwana, provocado por el giro de este continente hacia occidente que le había situado en posición austral. Esta circunstancia provocó una disminución del nivel del mar, y por tanto una menor superficie oceánica. Una mayor superficie de las tierras al irse retirando las aguas, así como una mayor extensión de los hielos, iba a favor de incrementar el albedo del planeta. Ello se tradujo a la larga en un enfriamiento de la atmósfera y una climatología más seca, provocando en las zonas intermedias una situación de menor humedad y mayor aridez. A pesar de ello, a finales del Carbonífero aún se mantenía un cierto clima cálido y húmedo en reducidas zonas ecuatoriales.



(A partir de datos del libro *“The Resilient Earth: Unprecedented Climate Change?”*, Allen Simmons & Doug L. Hoffman)

Además, a la disminución del nivel de los océanos se le unieron los movimientos continentales que iban cerrando espacios, lo cual iba produciendo un lento pero progresivo incremento de las zonas de aguas poco profundas que se hacía más palpable en las cada vez más estrechas zonas intercontinentales. Al mismo tiempo, este lento descenso del nivel del mar generaba también unas grandes extensiones de planicies costeras y la aparición de tierras llanas con escaso drenaje.

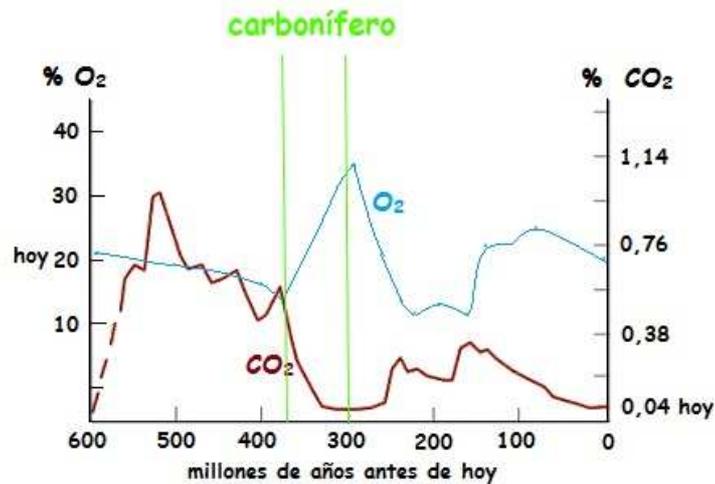
Así que el mantenimiento de las buenas condiciones climáticas que estaban dando una tregua en el trópico, unido a la gran extensión de hábitats favorables, propulsaron el desarrollo de grandes bosques en estas zonas, así como de su fauna marina. La bonanza de las poblaciones de estos animales se expresó en la aparición de inmensos sedimentos de calizas sobre Norteamérica y Europa, resultado del precipitado y acumulación de conchas y cuerpos de animales marinos muertos.

Las grandes plantas vasculares leñosas habían empezado a crecer de tamaño y a extenderse sobre los continentes hace unos 375 millones de años antes de hoy. El auge de estas plantas impulsó una sobreabundancia de materia orgánica que al morir quedaba enterrada en los limos de las ciénagas y que posteriormente era arrastrada en parte por las aguas de los ríos hasta el mar. De esta forma, otra gran cantidad de carbono orgánico se iba añadiendo al secuestrado por los esqueletos de los animales marinos.

Pero esto no fue la influencia más significativa de la biota vegetal durante el Carbonífero. En aquel momento la captura del carbono se veía magnificada por otros motivos. La exuberancia de la vegetación en las ubicuas zonas pantanosas originaba un exceso de materia orgánica en las aguas, lo que a su vez producía unas condiciones de anoxia que ralentizaba la descomposición de los detritos vegetales. A ello se añadía el hecho de que las plantas leñosas estaban constituidas en gran medida por lignina, un polímero que a los microorganismos tipo hongo, incluso a día de hoy, les resultaba difícil de descomponer, y más en una época en que todavía no habrían perfeccionado esta habilidad. Estas circunstancias hacían que el enterramiento de los despojos de las plantas no fuera seguido por una descomposición posterior, lo que conllevó a que con el paso de los años los restos orgánicos se convirtieran en carbón. La cantidad originada durante este periodo es la de mayor abundancia en toda la historia de la Tierra.

El gran florecimiento de plantas y bosques fue acompañado lógicamente por un incremento de los efectos de su función clorofílica, que se concretaba en una mayor absorción de CO_2 y una gran producción de O_2 que tuvo consecuencias en la composición de la atmósfera, en donde se redujo la participación del primer gas en paralelo a un incremento de la del oxígeno. La disminución del CO_2 se veía reforzada por las nuevas condiciones químico-orgánicas de las aguas comentadas en el párrafo anterior, que dificultaban la descomposición de la materia orgánica y favorecían el secuestro del carbono en el subsuelo.

Fuera por la causa que fuera, lo cierto es que se estima que el porcentaje de oxígeno en la atmósfera llegó hasta el 35%.



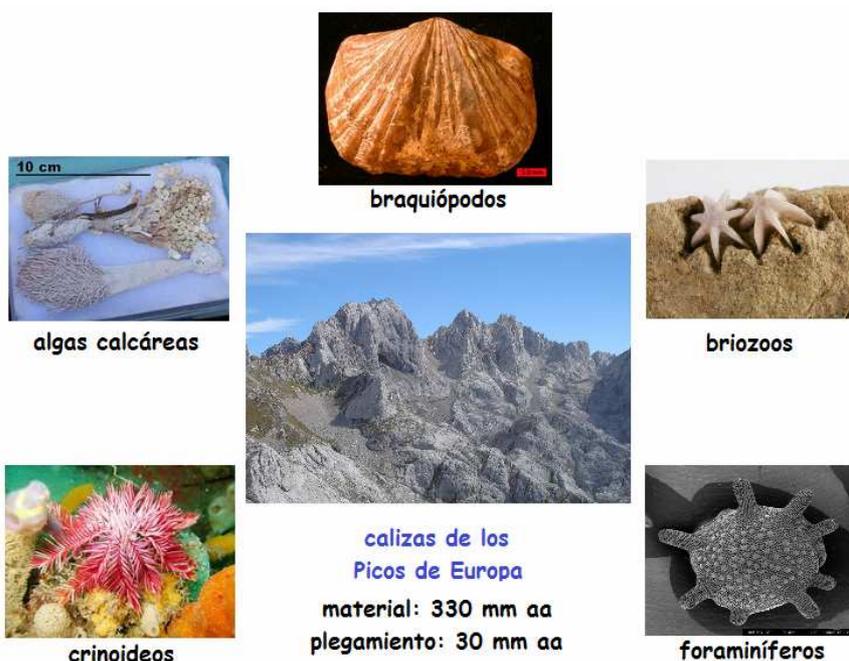
Hay teorías que afirman que el nivel de O₂ no pudo crecer más de este 35% máximo que indica la gráfica anterior, ya que a partir de este porcentaje los incendios forestales se hubieran descontrolado, realimentando un efecto freno sobre los valores absolutos de la función fotosintética al disminuir la masa vegetal.

Una de las consecuencias del alto porcentaje atmosférico del oxígeno fue que pudo afectar al metabolismo y a la evolución de las plantas y animales. Algunos estudios sugieren que hechos como el gigantismo de los insectos, o los cambios en los organismos marinos con sistemas respiratorios por difusión de gases, o el reforzamiento de la colonización de la tierra por los vertebrados a lo largo del fin del Paleozoico, hace entre 350 y 260 millones de años, fueron favorecidos en gran medida por las elevadas concentraciones de O₂ en aquella época. Suena plausible, ya que en el capítulo 7, que titulamos “*Rudimentos de gestión energética*“, aprendimos que cuando el oxígeno se constituyó como novedoso último receptor de electrones en las mitocondrias celulares, el metabolismo llegó a la máxima eficacia en el aprovechamiento energético. Como veremos en el siguiente capítulo dedicado a los insectos, el gigantismo pudo ser el resultado de la coevolución que podríamos titular como “más oxígeno-mejores fenotipos”.

La biota del Carbonífero

Después de presentar los aspectos generales del escenario del Carbonífero estamos ya preparados para ampliar el zoom sobre los diversos biotopos. Comencemos por los mares.

En líneas generales el **paisaje marino** no se diferenciaría mucho del que observábamos durante el Devónico. Los corales continuaban colaborando con esponjas y algas para seguir formando grandes masas de arrecifes calcáreos. Posiblemente el buen clima, las altas temperaturas de las aguas y el aún elevado porcentaje de CO₂ de inicios del periodo favorecieron el aprovechamiento de la oportunidad que suponía para los animales el uso del carbonato cálcico como protección. Los que habían adquirido esta habilidad prosperaron en los mares del Carbonífero. No sólo los corales, sino también las algas calcáreas, los braquiópodos gigantes con sus dos valvas de cabeza, los briozoos con su tubo protector por cuyo extremo agitaban unos tentaculillos para capturar alimento, y los crinoideos, cuyos esqueletos calcáreos se encuentran entre los fósiles más abundantes, puesto que formaban extensas praderas submarinas en las someras aguas que aparecían entre los continentes durante el proceso de su unión. Estos últimos animales, conjuntamente con los foraminíferos y sus esqueletos internos porosos, contribuyeron con una inmensa masa de material en la formación de calizas.

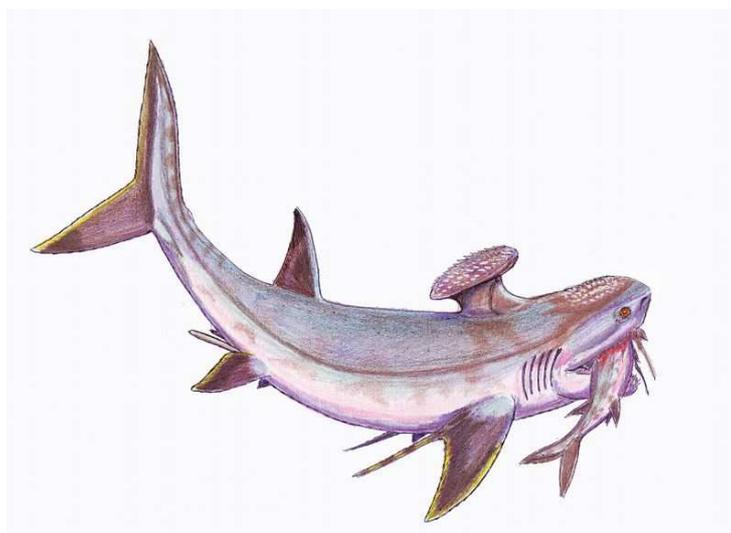


Responsables de las formaciones calizas del Carbonífero (Imágenes de Wikimedia, dominio público y CC BY-SA 2.5/3.0)

Podemos observar estas inmensas capas de calizas, por ejemplo, en la cordillera norteña de España. Ya comentamos que en este periodo la orogenia Herciniana/Varisca formó, entre otros, los montes gallegos. Junto a estos se habrían depositado las capas sedimentarias de calizas en el Carbonífero. Unos trescientos millones de años después se produciría una

nueva orogenia de la que ya hablaremos en su momento, la Alpina, que elevó estas calizas formándose los Picos de Europa.

Entre los animales nadadores dominaron ya los amonites y los tiburones y sus parientes, que desplazaron a los cefalópodos ortoconos con su concha recta y a los peces ostracodermos, a los placodermos y a los falsos tiburones. Se supone que el gran éxito en la radiación de los tiburones en este periodo fue debido al declinar de los placodermos, que comenzó a finales del Devónico, lo cual dejó espacios libres que permitieron a los nuevos organismos desarrollarse ocupando estos nichos vacíos. Como resultado de su éxito evolutivo, los tiburones desarrollaron una gran variedad de formas extrañas, como el caso del *Stethacanthus*, que tenía en el dorso una aleta como una brocha con dientes que se supone sería usada en sus rituales de emparejamiento.



Representación artística del Stethacanthus (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Mientras todo esto sucedía en los mares, en tierra firme iban prosperando las **plantas**.

Realmente el Carbonífero marcó el triunfo de la vida vegetal sobre la Tierra más allá del éxito consolidado de las plantas acuáticas. Su evolución y variación estuvo muy condicionada por el clima. Apoyadas en las semillas que ya habían triunfado a finales del Devónico, en la franja ecuatorial y tropical, húmeda y cálida, desarrollaron una notable masa forestal en las tierras bajas de marismas próximas a las costas.

En ellas abundaban las plantas que ya conocíamos del Devónico, como el enorme licopodio *Lepidodendron* o “árbol de escamas” por la forma de su

tronco, de un tamaño próximo a los 40 metros, o las *Pteridospermas*, que se caracterizaban por tener hojas grandes parecidas a las de los helechos, pero portadoras de semillas verdaderas. También en la zona templada tropical encontramos plantas más modernas, como la gigantesca “cola de caballo” *Calamites* de 20 metros en altura.



Hojas fósiles de Lepidodendron y de Calamites (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Conjuntamente con estas plantas de hoja ancha y modelo helecho, con semillas, empezaron a convivir las gimnospermas, también con semillas. Ejemplos muy conocidos por nosotros lo son las coníferas: pinos, abetos, cipreses...

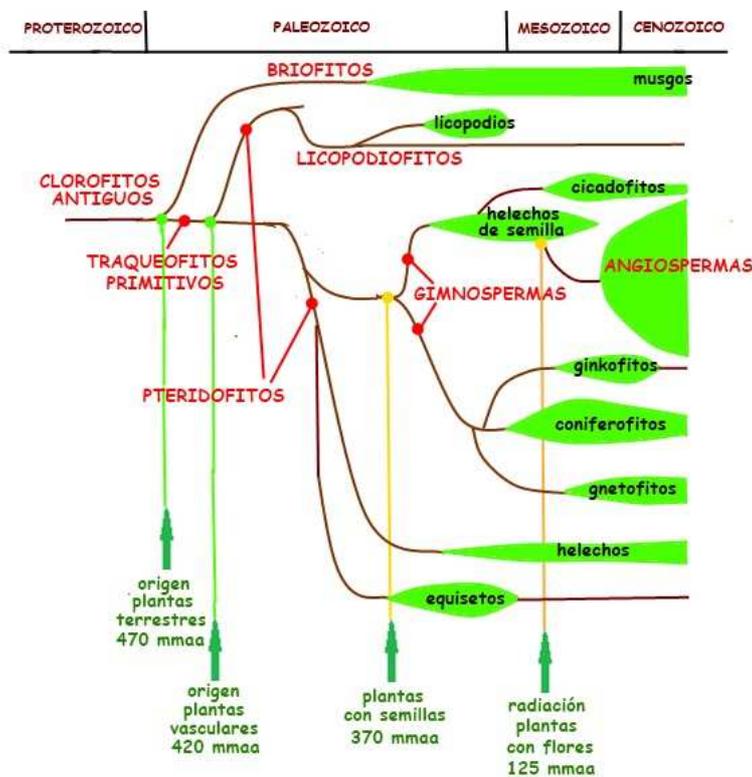
Está ampliamente aceptado el hecho de que las gimnospermas se originaron a finales del Carbonífero, como resultado de un suceso de duplicación total de su genoma acaecido hace unos 319 millones de años. Sus semillas no se forman en un ovario cerrado que evoluciona hacia un fruto, como les pasará más tarde a las angiospermas, sino que aparecen desnudas y libres en las escamas de los conos. De ahí el nombre: del griego γυμνός, *desnudo*, y σπέρμα, *semilla*.



Cono y semilla de gimnosperma

Las **coníferas más tempranas** aparecieron en el Carbonífero tardío, pero con un aspecto diferente a las actuales. Sus antepasados fueron los *Cordaitales*, un tipo de gimnospermas con unas largas hojas con forma de cinta. Su tamaño era muy variado, entre el de un arbusto grande hasta el de un árbol pequeño. La mayoría estaban establecidos en los manglares, con suelos muy salobres, situación en la que la absorción de agua no se veía favorecida. Posiblemente por esto, al irse acostumbrando sus individuos a vivir con poca agua, se fueron aclimatando a ambientes más secos, y por tanto fueron los que prosperaron en aquella época.

Las primeras coníferas verdaderas no dejaron fósiles en los depósitos de carbón. Con toda seguridad su adaptación a la sequía les había permitido colonizar latitudes más altas, fuera de las zonas tropicales en donde ya sabemos que se formaron los grandes yacimientos de tal mineral. Tenían ramas y hojas en forma de agujas, realmente impermeables, y se parecerían a la *Araucaria* moderna. Sus conos estaban peor organizados que las modernas piñas, lo que indicaría su conexión con los ya mencionados *Cordaitales*. A pesar del éxito que supuso su evolución, su radiación definitiva debió esperar a los huecos que dejó la masiva extinción de finales del Pérmico.



Árbol evolutivo de las plantas (a partir del libro “Cinco reinos, guía ilustrada de los phyla de la vida en la Tierra”, Margulis y Schwartz, 1985)

Por suerte podemos dejar volar una vez más nuestra imaginación apoyados en el descubrimiento⁽⁵¹⁾ cerca de Wuda, en China, zona muy rica en depósitos de carbón. Allí, hace casi 298 millones de años, en la frontera del Carbonífero con el Pérmico, cayeron en unos pocos días grandes cantidades de cenizas volcánicas que sepultaron un bosque pantanoso, conservando las plantas que lo formaban. Normalmente el suelo estaba recubierto por una capa de agua de varios centímetros que protegía de la oxidación a la abundante masa de residuos orgánicos que iban alimentando a la turbera. Durante las épocas de estiaje se generaba sobre el terreno una base de plantas herbáceas temporales, principalmente helechos y equisetos.



Reconstrucción del bosque de Wuda (Fuente: Ren Yugao /PNAS)

Durante el proceso de estudio del yacimiento, al retirar las cenizas aparecieron los troncos caídos justo en el lugar exacto en donde habían crecido. La mayoría correspondían a árboles pequeños de protoconíferas con hojas, troncos y piñas intactos. Se han hallado seis grupos de árboles diferentes, algunos de los cuales tenían unos 80 metros de alto. Los más abundantes son los helechos arborescentes que poblaban la parte inferior del bosque mientras que en las alturas dominaban el licopodio *Sigillaria* y

los *Cordaitales*. Los investigadores han encontrado junto a los anteriores especímenes ejemplares de un árbol denominado *Noeggerathiales*, antepasado de las gimnospermas y con alguna característica que vemos en las coníferas. A partir de estos descubrimientos se ha podido imaginar un fotograma, tal como vemos en la figura siguiente, que representa cómo debían ser aquellos bosques, en los que sobre un entorno de marismas dominaban los *Pteridospermas* con sus copas de hojas de helecho. Por encima asomaban las largas estructuras de los licopodios y con menor altura algunos *Cordaitales* antecesores de las coníferas.

Con la imagen en la cabeza podemos seguir imaginando una escena llena de vida:

“La pegajosa humedad atrapada entre las raíces de los árboles de los manglares se había sobrecalentado bajo el sol inclemente de aquel paraje ecuatorial. El viento parecía un imposible en aquella densidad de tonalidades amarillo verdosas, reliquias de la batalla que la luz solar mantenía con el espeso dosel vegetal. El agua estancada y salobre, renovándose apenas con el movimiento de las mareas, parece que sólo pueda albergar formas muy sencillas y resistentes de vida, como las bacterias. Todo es una ilusión alejada de la realidad. Aguzando el oído se oiría un fondo sonoro de zumbidos, algún rápido chapoteo, el siseo de una hoja desplazada... la Vida estaba ahí. Insectos, anfibios e incluso algún pez lobulado en la entramada red de la subsistencia. En este momento sentimos la necesidad de echar una ojeada a estos protagonistas...”

...pero para ello tendremos que esperar a próximo capítulo, en el que nos deleitaremos con estos pequeños, o no tan pequeños por aquella época, bichejos que son los insectos. Para más tarde, en el siguiente, contemplar la más que trabajosa vida de los tetrápodos, anfibios y reptiles en su empeño de colonizar el hábitat terrestre.

34. El Carbonífero nos incita a hablar de insectos

En el anterior capítulo nos habíamos paseado por el periodo Carbonífero, lo que nos permitió conocer su geología, climatología y flora. Hoy continuamos en él, época en la que tenemos constancia fehaciente de que **un animal inicia el vuelo por primera vez**, lo que nos incita a ampliar la visión del mundo de los insectos. Debo advertir que, una vez más en un mismo capítulo nos asomaremos a varios periodos geológicos, además del que le corresponde cronológicamente.

La primera mención a los insectos la hicimos en el capítulo 19 que titulamos “*Los filos del Cámbrico*” cuando anunciábamos cómo una de las ramas del árbol de los artrópodos iba a desembocar en esta clase del filo Hexápodo. En el capítulo 29 dedicado al Silúrico empezábamos a desvelar el misterio al hablar de cómo un artrópodo de agua salada, un decápodo, se habituó hace unos 470 millones de años a un entorno de agua dulce al transformarse en un braquiópodo, para después dar el salto a la tierra seca inaugurando la saga de los hexápodos hace unos 420 millones de años. Con posterioridad, en el capítulo 31 que habíamos titulado “*El Devónico: la edad de los peces*” comentábamos cómo en el yacimiento escocés de Rhynie Chert se encontraron fósiles de los primeros hexápodos terrestres conocidos, de inicios del período Devónico hace alrededor de 410 millones de años.

En este capítulo intentaremos hacer un breve repaso de su historia evolutiva.

El primer escalón en la diversificación de los hexápodos hacia los insectos se basa en la situación de las piezas bucales, si están en el interior del cuerpo o en el exterior. Los insectos son de estos últimos. El siguiente elemento diferenciador, ya dentro de la clase Insecta, es la forma en que articulan las mandíbulas, si con una única rótula o con doble. De ahí pasamos a la aparición de las alas, con todas sus modalidades. Los insectos alados más ancestrales no podían doblar las alas sobre el abdomen. Con posterioridad la morfología de estos apéndices se hizo muy diversa, pudieron doblar las alas, las pudieron arrugar, perdieron un par, convirtieron el primer par en protección quitinosa del segundo... La penúltima conquista, aunque surgió casi a la par de la aparición de las alas,

fue la *metamorfosis* con la que mediante la diversificación fenotípica conseguían los nichos más adecuados para cada etapa vital del insecto. La última y más tardía evolución fue más bien una conquista social que orgánica: algunos insectos, como las abejas o las termitas, se vuelven gregarios.

No todo sucedió en el Carbonífero, pero su historia a lo largo de este periodo es una buena excusa para profundizar en el camino de los insectos.



Los insectos del Silúrico debían ser muy sencillos y no habrían desarrollado aún alas. Pero ya en el **Carbonífero Temprano aparecen con toda claridad evidencias de la existencia de estos apéndices**. Su desarrollo pudo ser incluso anterior, del Devónico, como se puede deducir del registro fósil del yacimiento de Rhynie Chert, en donde se han encontrado vestigios de insectos que tenían que tener alas.

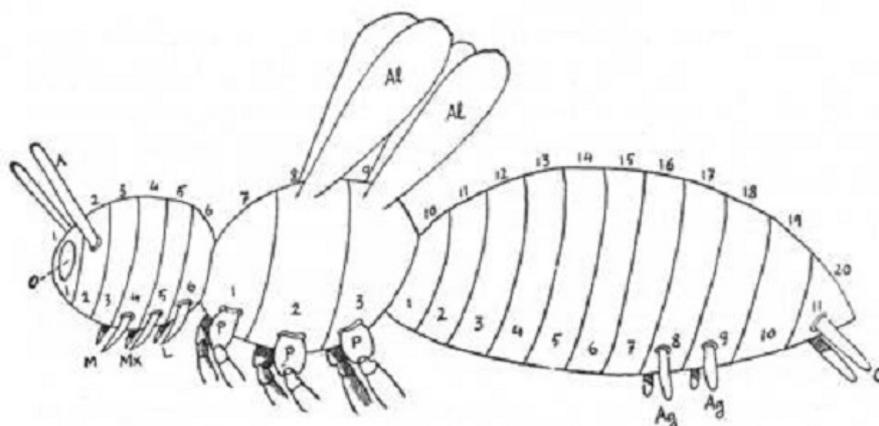
Los insectos fueron los primeros animales en volar, unos 150 millones de años antes que los reptiles y 230 antes de que lo hicieran las aves. Y lo hicieron gracias posiblemente a una atmósfera diferente a la actual, con una mayor densidad y una mayor concentración de oxígeno.



Trazas fósiles de un insecto volador del Carbonífero, seguramente se corresponde a un efemerópteros (PNAS⁽⁵²⁾, fair use). A l derecha un efemeróptero actual: Ephemera danica (Wikimedia, CC BY-SA 2.5)

En el año 2011 se publicó⁽⁵³⁾ el descubrimiento de unas huellas dejadas por un insecto del Carbonífero tardío, hace 310 millones de años. La traza fósil demuestra que su autor era un insecto volador y, probablemente, representante de la orden de los efemerópteros, más conocidos como moscas de mayo. La ausencia en estas trazas de marcas de las alas y de la cabeza así como la clara manifestación de huellas en los alrededores, hace pensar que el insecto vino volando desde arriba adoptando en el suelo una posición con las alas y la cabeza sobre el suelo. Precisamente como lo hace una mosca de mayo.

El desarrollo de las alas aportaba una gran ventaja: una mejora en la capacidad de huida en unos tiempos, los del Carbonífero, en que proliferaban los depredadores anfibios y artrópodos. Como con toda seguridad lo pudo ser algún tipo de miriápodo. Los primeros insectos alados tenían estos apéndices extendidos a lo largo del cuerpo, pero que no podían doblarse sobre éste como lo hacen la mayoría de los actuales. Este tipo de insectos dominaron este periodo y el siguiente, el Pérmico.



Esquema de la segmentación de los insectos (ocwus.us.es, CC BY-NC-SA 2.5)

Para entender un poco mejor cómo aparecen las alas en estos animales vamos a fijarnos en cómo están estructurados sus organismos. En todos los artrópodos, como sabemos ya de lo visto en el capítulo 24, se da una segmentación corporal, una repetición de pautas corporales alineadas desde la cabeza a la cola. En particular, los insectos tienen seis segmentos que forman la cabeza, de los que del segundo “brotan” las antenas y de los dos siguientes todos los apéndices bucales. El tórax está conformado por tres segmentos que, al contrario de lo que pasa con los de la cabeza, se aprecian visualmente con facilidad. De cada uno de ellos nacen un par de patas, siendo los dos últimos los que normalmente desarrollan las alas. Los

siguientes segmentos, en número variable según las especies, forman el abdomen.

Existen varias hipótesis acerca de cómo evolucionaron las alas en los insectos. Hay consenso en que estos miembros y su mecanismo de control y propulsión aparecieron sobrepuestos a los apéndices de los segmentos primitivos, que en un principio estaban adaptados sólo para caminar: inicialmente patas y alas quedaron dispuestas unas junto a las otras en el organismo de los insectos, algo muy diferente a lo que sucedió con las alas de las aves, que evolucionaron mediante la transformación de una pata. Se cree que al principio las protuberancias que más tarde se volvieron alas les servirían a los insectos como balancines con los que equilibraban el cuerpo durante las caídas. Gracias a ellos lo harían de pie, lo que disminuiría el riesgo de ser atrapados, al poder ocultarse con rapidez. Con posterioridad las aprovecharon para iniciar un tímido deslizamiento aerodinámico, pero de forma estática, sin que fueran capaces de moverlas. Esta habilidad debió ser el siguiente paso que se concretó a la par que el desarrollo de las articulaciones de su base, con lo que se aumentó el control y la capacidad y fuerza de empuje.

También hay otras hipótesis que postulan que las alas pudieron originarse a partir de una de las agallas, ya que estos apéndices presentan bastantes puntos en común con las alas, como puede ser la elevada densidad de venas o el poseer músculos y nervios.

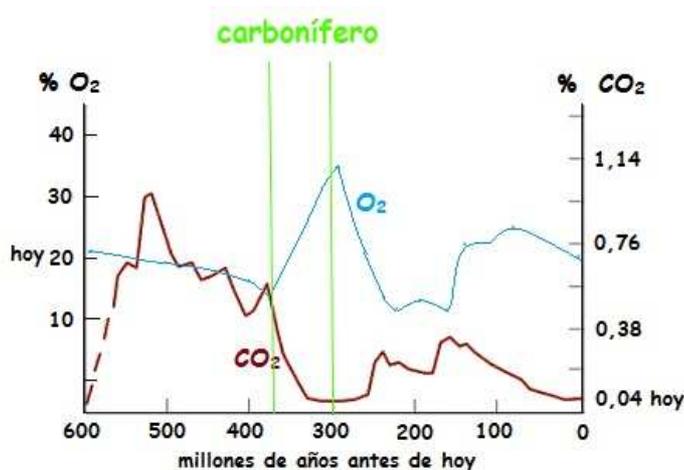


Imagen artística del hexápodo Palaeodictyoptera, carbonífero/pérmico, con una envergadura de alas de casi 20 centímetros (Imagen: Jon Augier, Museum Victoria)

En el Carbonífero medio existían ya numerosos insectos, perfectamente diferenciados en al menos once órdenes, entre los que destacan los muy parecidos *Palaeodictyoptera* (imagen anterior), *Diaphanopteroidea* y *Megasecoptera*, que en algunos casos alcanzaron envergaduras de hasta 75 centímetros, y los *Ephemeroptera* que llegaron a alcanzar los 45 centímetros.

Puede parecer que todos los insectos y artrópodos del Carbonífero fueron muy grandes, como los milpiés de hasta dos metros, arañas de más de cincuenta centímetros y libélulas con alas del tamaño de una gaviota. Pero fueron la excepción.

Hay una explicación para aquellos que crecieron de forma desmedida según los parámetros de los hombres de hoy. Los insectos tienen un aparato respiratorio muy particular: físicamente consiste en un par de aperturas en cada segmento corporal que dan paso a un sistema de tubos, las tráqueas, que se ramifican hasta llegar casi a nivel celular. Estos tubos ponen en contacto el oxígeno del aire con los tejidos internos del insecto, en donde se lleva a cabo la difusión del gas hasta las células.



La efectividad de esta difusión es proporcional a la presión parcial del oxígeno en la atmósfera: a mayor presión, mayor difusión y mayor disposición de O₂ para el metabolismo. La explicación es intuitiva, ya que cuanto mayor es la concentración de un gas en la atmósfera, mayor es su peso a nivel de la superficie de la tierra, ejerciendo más presión sobre las tráqueas y traqueolas. Si la concentración atmosférica de O₂ alcanza valores tales como el 35%, su tasa de difusión es un 67% más alta que la que se produce cuando la concentración es de un 21%, como la actual. La física premia a estos animales que tienen una función respiratoria basada en la difusión del oxígeno. Quizás sea por esto el que los insectos

constituyan el grupo que presenta el mayor número de casos conocidos de gigantismo.

Algo parecido le pudo pasar a algún tipo de anfibio con una dependencia respiratoria cutánea muy grande. Con una mayor presión de oxígeno y/o vascularizando mejor su piel, podían también tener a su disposición mayores cantidades de este gas para su metabolismo, lo que facilitaría también su gigantismo.

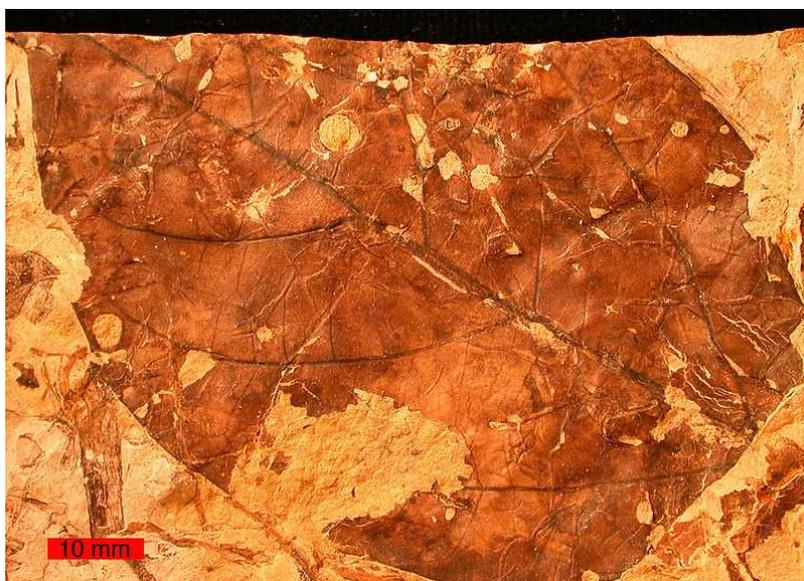
En el Carbonífero superior aparecen ya fósiles de una gigantesca libélula, el *Meganeura*, que vivió hace 300 millones de años. Con una envergadura de ochenta centímetros y una longitud de un metro, *Meganeura* es el insecto volador más grande de todos los tiempos. Su peso se ha estimado en unos 150 gramos. Como las libélulas modernas, tenía enormes ojos compuestos, fuertes mandíbulas, el cuerpo largo y delgado y patas espinosas. Tanto en su fase de ninfa como en su forma adulta, *Meganeura* era un terrible depredador. La ninfa, acuática, se alimentaba de peces, anfibios y grandes invertebrados. El adulto, por su parte, capturaba insectos voladores y pequeños anfibios y reptiles utilizando sus grandes mandíbulas.



El autor jugueteando asustado con una Meganeura en los altos de Morcuera de la sierra madrileña (Imagen de Meganeura: Wikimedia, dominio público)

En esta época del Carbonífero tardío, los insectos consiguieron otro importante escalón evolutivo: la capacidad de doblar las alas hacia atrás sobre el abdomen. Esto les facilitó versatilidad y agilidad para huir de un depredador y esconderse con mayor facilidad, al poder aprovechar para este propósito nuevos nichos, los más estrechos y recónditos, habilidades que con las alas extendidas permanentemente a lo largo de los lados le eran imposibles.

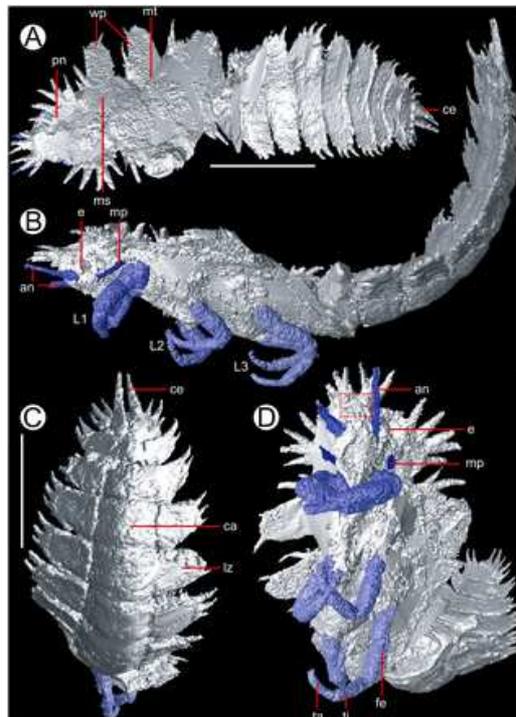
Hemos introducido más arriba a *Palaeodictyoptera* como uno de los gigantes voladores del Carbonífero, del que quiero destacar dos aspectos. El primero relacionado con sus alas ya que disponía de seis, dos pares “normales” podríamos decir y otro par delantero, más pequeño, que posiblemente le servirían para dirigir el vuelo. Un curioso y raro hexáptero. La segunda característica a resaltar es la que ha llevado a su familia a ser conocida como la de los “*súper-chupadores*“. Con ellos aparecía por primera vez unos apéndices bucales especializados para taladrar o picar y para succionar. Nos recuerdan a los molestos mosquitos aunque realmente se considera a *Palaeodictyoptera* como los primeros insectos herbívoros ya que se conocen determinados fósiles de tallos y hojas de plantas en los que se observan “mordeduras” que encajan en su forma con el “pico” de estos insectos.



Hoja fósil de Viburnum lesquereuxii en donde se reconocen “mordeduras” de insectos herbívoros (Wikimedia, dominio público)

A la par del desarrollo de las alas, algunos insectos iban desarrollando también una estrategia de vida basada en la *metamorfosis*, que es un proceso biológico por el cual un individuo pasa de joven a adulto a través

de una serie de cambios hormonales y morfológicos más o menos complejos. En los estadios más ancestrales del proceso, las larvas -en este caso llamadas ninfas- se asemejaban en gran medida a los adultos, a los cuales se iban acercando mediante sucesivas mudas de su exoesqueleto quitinoso. Con posterioridad, y aún en el Carbonífero, los insectos dieron un último salto: desarrollan la *metamorfosis completa* por la que el proceso introduce unas etapas intermedias en las que las larvas eran completamente distintas a los adultos -un ejemplo serían las orugas con respecto a las mariposas-. Esta nueva habilidad permite hacer más eficaz al insecto, ya que en la fase de larva se especializa en la alimentación, y en la fase de adulto se especializa en la reproducción. Además, adoptar la metamorfosis tuvo ventajas adicionales muy importantes, ya que les permitió beneficiarse de un mayor número de hábitats diferentes: al ser las larvas acuáticas y el adulto terrestre, un insecto dispondría primero de nutrientes acuáticos y luego, de adulto, de un ambiente aéreo/terrestre en el que se incrementaban las probabilidades de encontrar una pareja o de dispersarse. De esta forma, además, nunca competirían un individuo adulto con uno joven. De esta época data el primer hallazgo de un insecto fósil con metamorfosis completa o complicada, una larva en forma de oruga de un tipo que corresponde a un animal parecido a las avispas.



Representación tridimensional de ninfa de un insecto polineóptero del yacimiento de Montceau-les-Mines Lagerstätte de Francia (PLOS⁽⁵⁴⁾, fair use)

Aunque siendo sumamente importante para su camino evolutivo, no vamos a hablar aquí todavía de la última habilidad de algunos insectos, la sociabilidad, que apareció mucho más tarde durante el periodo Cretácico, en el entorno de hace unos 100 millones de años. Lo haremos en su momento.

Es evidente que los insectos implantaron durante el Carbonífero las bases de su futuro éxito. Actualmente comprenden el grupo de animales más diverso de la Tierra, con aproximadamente un millón de especies descritas, más que todos los otros grupos de animales juntos, y con estimaciones de hasta 30 millones de especies no descritas, con lo que potencialmente representarían más del 90% de las formas de vida del planeta. Las causas del éxito se apoyan en su capacidad de acomodo a todos los tipos de nichos medioambientales tras la extrema adaptación que les supuso abandonar el agua y dispersarse por la tierra firme, con la necesidad imperante de mantener el grado de humedad adecuado. En este proceso se habría “inventado” el “sistema traqueal”, cuyos túbulos y opérculos reducían la pérdida de agua durante la respiración; se habría inventado la cutícula impermeable externa, reminiscencia de la de su vida artrópoda marina aunque ahora más manejable; y se habría conseguido la generación de múltiples cuerpos grasos en su organismo, auténticos depósitos de agua con los que el animal podía enfrentarse a periodos de sequía y escasez. Ya hemos comentado cómo la metamorfosis fue otro factor diferenciador de éxito, al que tenemos que añadir el magnífico aprovechamiento de la oportunidad que les daban las plantas, con las que coevolucionaron, primero al alimentarse con sus pólenes ya desde el Devónico, para más tarde hacerlo con los néctares de las flores de las nuevas plantas angiospermas del Mesozoico tardío. Los insectos se aprovechaban de la oferta nutricia y las plantas se apoyaban en los insectos para expandir sus pólenes y semillas y multiplicar su fecundación.

Abandonamos aquí la travesía del mundo de los primitivos insectos y sus esfuerzos por sobrevivir en un mundo seco y hostil. En el capítulo siguiente haremos otro interesante paseo a través de las peripecias de los tetrápodos ya acomodados en tierra y de cómo se las ingeniaron para aprovechar sus oportunidades. Nos esperan los anfibios y los reptiles.

35. Anfibios y reptiles del Carbonífero

Con este capítulo completamos el periodo Carbonífero que iniciamos hace dos. Hemos hablado ya del escenario ambiental, de la biota vegetal, hicimos algunos apuntes sobre lo que pasaba en lo más oculto de las aguas oceánicas y completamos el itinerario profundizando en la fantástica vía evolutiva de los insectos. Ahora nos vamos a dedicar a otra excitante aventura: cómo los animales tetrápodos conquistan la tierra y devienen anfibios y reptiles.

Seguimos moviéndonos en el periodo comprendido entre hace 359 y 299 millones de años.



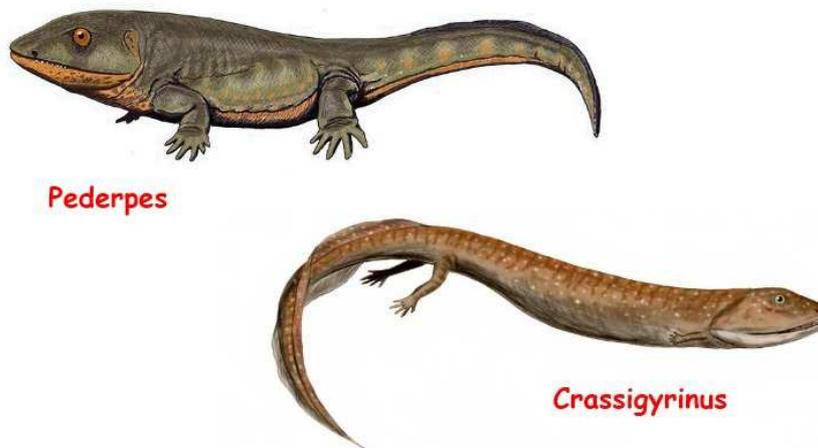
La riqueza de vida animal en los magníficos bosques ecuatoriales del Carbonífero no se acababa en la variada y rica fauna de los invertebrados. Ya conocemos la aventura de finales del Devónico cuando algún pez sacó su hocico fuera del agua en busca de la sabrosa comida que suponía la primera colonización terrestre de los artrópodos. Sin embargo, el salir fuera de su medio habitual conllevaba a su vez muy serios problemas. La piel necesitaba mantener la humedad para que no se degradara y las puestas de huevos debían seguir haciéndose en un ambiente líquido, como sus abuelos peces, para que no se desecaran. En aquellos momentos iniciales del Carbonífero el hábitat terrestre era un lugar de tránsito en donde buscar el alimento para volver de nuevo a las aguas que no se podían abandonar completamente, una necesidad imperiosa para los anfibios. Aún faltaba un poco de tiempo para que los reptiles llegaran al “descubrimiento” del huevo blindado, el amniótico, que les permitiría olvidarse de la dependencia absoluta del agua.

Primeros tetrápodos exitosos: los anfibios

En el Carbonífero inferior los anfibios no se parecían demasiado a sus parientes actuales. Consiguieron un amplio espectro de formas y modos de

vida, desarrollando todo tipo de sistemas mecánicos para aguantar su peso, mantenerse en pie y moverse sobre la tierra. En su mayoría tenían forma semejante a la de las salamandras, e incluso alguno se asemejaba a los cocodrilos. Otros desarrollaron una segmentación exagerada, tomando forma de serpientes sin patas o con unos pequeños apéndices. En aquella época aún no se había desarrollado la morfología de las ranas.

El registro fósil de tetrápodos terrestres y de peces tetrapodomorfos de inicios del Carbonífero es conocido por su pobreza y por su nombre: “*Brecha de Romer*” en honor al paleontólogo que lo estudió. Supone una discontinuidad entre los registros de los primitivos bosques y la alta diversificación de los peces del Devónico, y los de las formas más modernas y evolucionadas de los seres acuáticos y terrestres del Carbonífero. De tal manera que, datados en los primeros 15 a 20 millones de años de este último periodo, sólo se han encontrado unos pocos ejemplares fósiles. Casi todos ellos en yacimientos escoceses, como el del primitivo tetrápodo *Pederpes*, el pequeño protoamniota *Casineria* de 15 centímetros o los *Lethiscus* y *Crassigyrinus*, animales sin patas semejantes a una serpiente. Todos ellos solían ser de un tamaño más pequeño que el de los tetrápodos del Devónico.



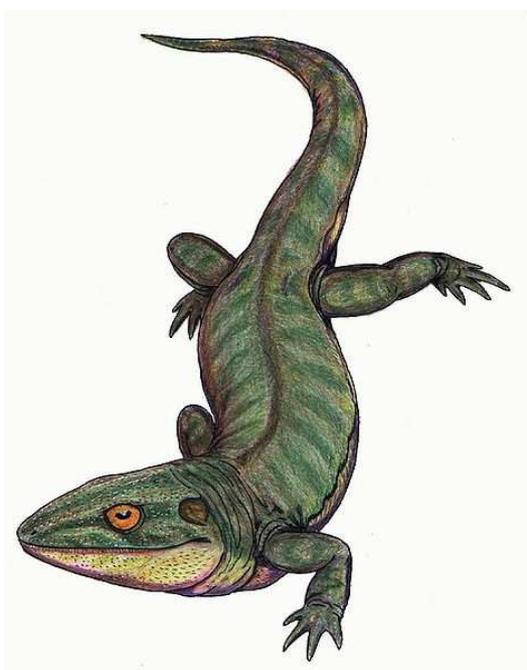
Representación artística de Pederpes y Crassigyrinus (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Posiblemente esta tendencia a la disminución corporal fue una respuesta evolutiva consecuencia de las aún relativamente bajas concentraciones de oxígeno atmosférico a inicios del periodo. Para un animal dependiente de la absorción cutánea de este gas, el bajo contenido del mismo le obligó a explotar la ventaja que suponía la progresivamente favorable relación superficie/volumen al ir disminuyendo su tamaño. Un factor 1/2 en la

envergadura suponía un factor $1/4$ en la superficie corporal, camino de entrada del oxígeno, y un factor $1/8$ en el volumen donde se llevaban a cabo las reacciones metabólicas.

Durante esta época oscura, y a pesar de que no dispongamos de demasiadas evidencias de ello, la Vida inevitablemente tuvo que seguir adelante. En estos años sin referencias se tuvieron que desarrollar aquellas innovaciones que vamos a observar como realidades justo después. A la salida de la “*Brecha de Romer*” nos vamos a encontrar con un buen número de variedades morfológicas y filogenéticas, que se concretan en tetrápodos de una gran variedad de tamaños, estructuras craneales, formas corporales y hábitos, patrones estos que fueron muy distintos a los de los animales del Devónico. **En este intervalo de 20 millones de años se habituaron a vivir en tierra y a respirar directamente el aire**, aunque desgraciadamente aún no sabemos cómo se produjo el proceso.

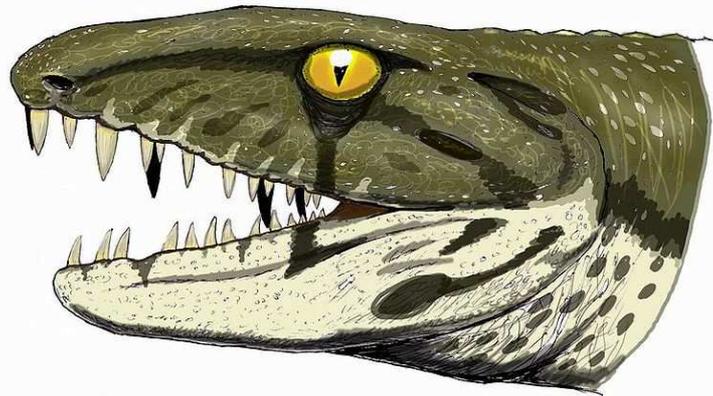
Pasados estos primeros años ciegos se comienza a disponer de información. En su mayoría proviene de fósiles encontrados en un yacimiento escocés, próximo a la ciudad de East Kirkton, datado alrededor de hace 340 millones de años. Este yacimiento se formó mediante los sucesivos depósitos que se iban decantando en el fondo de un lago no muy profundo situado en un entorno con gran abundancia de vegetación y con la evidente presencia de conos volcánicos.



*Representación artística del temnospóndilo Dendrerpeton
(Wikimedia, dominio público)*

La mayor parte de la biota que allí se encontraba estaba constituida por plantas propias de la época, como gimnospermas y pteridospermas, así como animales terrestres entre los que se reconocen ejemplares de miriápodos y quelicerados, y los primeros representantes de la mayoría de los principales grupos de anfibios que dominaron el resto del Carbonífero: temnospóndilos, anthracosaurios, lepospóndilos -microsauros o aistópodos-, de los que damos unas breves pinceladas a continuación.

Los temnospóndilos, que se originaron hace 340 millones de años, presentaban un estilo de vida semiacuático y tamaños diversos, desde unos treinta centímetros hasta quizás unos diez metros. Ya hacia finales del Carbonífero y a comienzos del siguiente período, el Pérmico, un gran número de grupos desarrollaron extremidades y vértebras robustas, adaptándose a un estilo de vida terrestre. Los numerosos dientes cónicos y duros, sumados a los grandes colmillos palatales, sugieren que eran depredadores, carnívoros, insectívoros, piscívoros o cualquier combinación de estas formas de alimentación.



Representación artística de una cabeza de Anthracosaurus russelli un animal semejante a una serpiente (Wikimedia, dominio público)

El *Anthracosaurus* vivió hace aproximadamente 310 millones de años. Habitó en pantanos, ríos y lagos de tierras que hoy en día son parte de Escocia. Fue un gran depredador acuático similar a las serpientes, pudiendo haber alcanzado más de tres metros de longitud. Sus mandíbulas estaban provistas de dientes puntiagudos.

Los *lepospóndilos aistópodos* eran animales altamente especializados de hábitos predominantemente acuáticos. Semejantes a las serpientes y de

tamaño por lo general reducido, exhibían una gran diversidad de formas y adaptaciones, de forma que filogenéticamente hay entre cuatro y seis grupos reconocidos. Presentaban un cuerpo particularmente alargado, de entre cinco centímetros y casi un metro de longitud, con una reducción en las extremidades y la pelvis. Sus primos los *lepospóndilos microsaurios* se asemejaban a las salamandras, con especímenes de todos los tamaños, ya fueran animales relativamente grandes que podían poseer un largo total de sesenta centímetros o más pequeños con cráneos que no medían más de siete milímetros.



(Imágenes a partir de Wikimedia, GNU FDL 1.2)

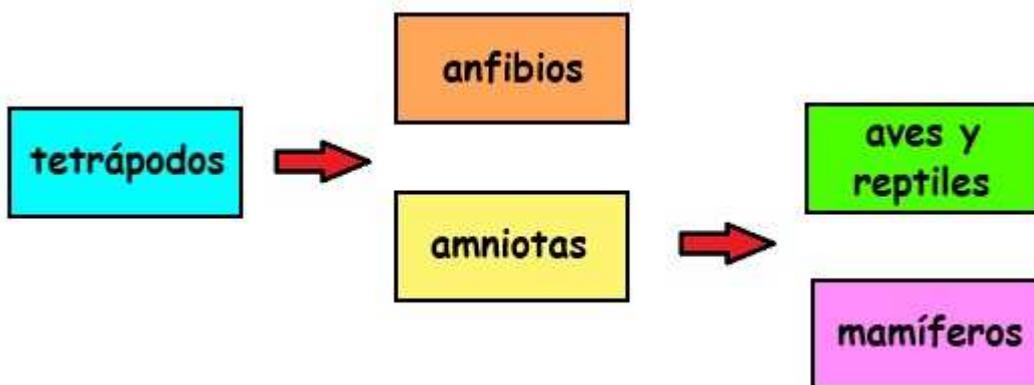
Interludio

Hace 305 millones de años, al final del Carbonífero, se produjo un episodio de extinción llamado el “colapso de las selvas lluviosas”, que se produjo abruptamente a lo largo de unos pocos años. El descenso de la concentración de CO₂ y la paralela glaciación en Gondwana introdujo un cambio climático caracterizado por el frío y la sequía, que poco a poco devastó las exuberantes selvas tropicales, fragmentándolas en “islotes” separados confinados en valles húmedos cada vez más distantes y que supuso la extinción de muchas especies de plantas y animales. A lo largo de este episodio los helechos se transformaron en plantas oportunistas que fueron ahogando poco a poco los bosques de licopodios, siendo sustituidos por helechos arbóreos. Por el contrario, los bosques de coníferas, que poblaban latitudes más altas y que estaban mucho mejor preparados para afrontar la aridez, no se vieron seriamente afectados.

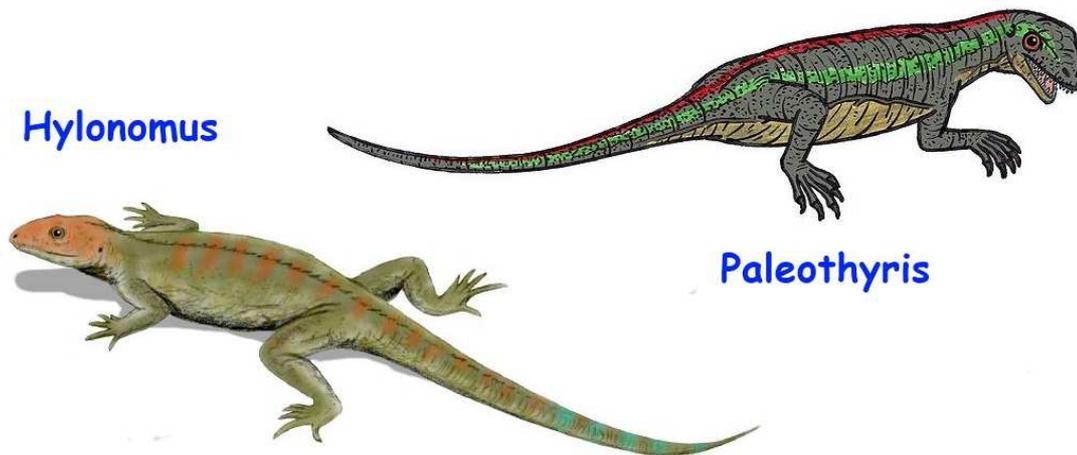
Tras los anfibios, los reptiles

El colapso de los bosques perjudicó en gran medida el desarrollo de los anfibios, los cuales no podían soportar bien aquellas condiciones secas y frías. Por el contrario, los incipientes reptiles se encontraban corporalmente mejor adaptados para sobrellevar estas extremas circunstancias climáticas. Fue trascendental el haber modificado sus huevos, blindándolos con varias capas que impedían que se desecaran: el **huevo amniótico** que luego adoptaron todos sus descendientes, aves y mamíferos.

Los reptiles provenían de una evolución de los primeros tetrápodos. Los más ancestrales fueron los *reptiliomorfos* que son un grupo de tetrápodos que reúnen a la vez características de reptiles y de anfibios. Se originaron a comienzos del Carbonífero, y lo mismo había especímenes que vivían en agua como en hábitats terrestres. De ellos derivaron los amniotas que luego se diversificarían en dos líneas, los reptiles y aves y los mamíferos.



El reptilimorfo *Antracosaurio*, que etimológicamente significa el “*lagarto del carbón*” y del que ya hablamos como anfibio un poco más arriba, pudo ser el ancestro común de la rama de los amniotas. De él evolucionaron los pequeños y ligeros *captorrínidos*, familia que agrupa a los reptiles más ancestrales, entre ellos el *Paleothyris* (300 millones de años) o el *Hylonomus* (315 millones de años). Eran animales de unos 20 centímetros de longitud, parecidos a un lagarto, que aún mantenían las patas extendidas hacia los lados y que tenían la cabeza pequeña, de la que habían mejorado la movilidad al haber separado del cráneo las dos primeras vértebras cervicales. Tenían el esqueleto ligero con una cola larga terminada en punta y dedos largos y muy finos. Serían insectívoros que se desplazaban silenciosamente a través de la vegetación baja para cazar grandes insectos y ciempiés. Y, lo más importante, **fueron los primeros amniotas verdaderos**.



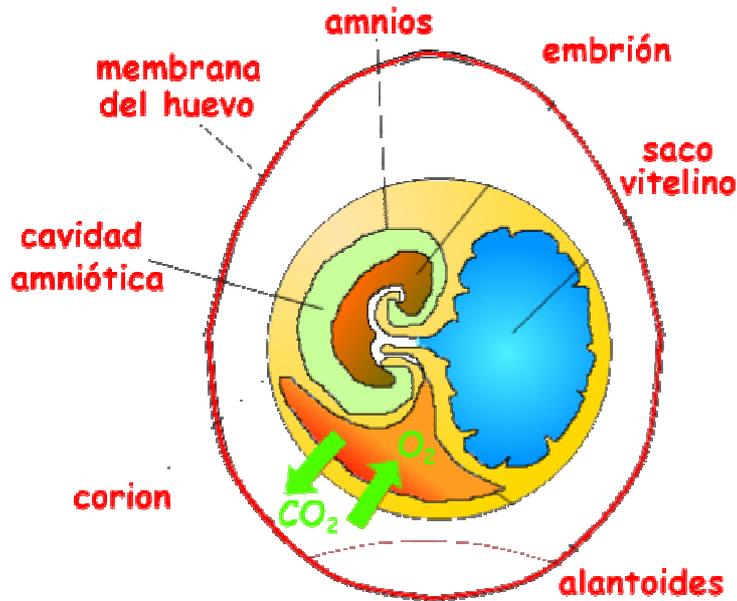
*Representación artística de los reptiles Hylonomus y Paleothyris
(Imágenes de Wikimedia, GNU FDL 1.2 y CC BY-SA 3.0 Unported)*

Los amniotas del Carbonífero tardío, hace 300 millones de años, habían conseguido unas habilidades muy competitivas que les permitieron desarrollarse de forma espléndida. Ya en aquella época incluían unos veinticinco géneros de pequeños a medianos reptiles comedores de insectos. Esto indica que su camino evolutivo fue mimado por la selección natural. Veamos cuáles fueron las mejoras de diseño que consiguieron.

La más importante y ya comentada es la del huevo amniota (considerando *huevo* como cigoto, siendo el de las aves, con su cascarón cálcico, un caso particular). En este tipo de huevo el embrión se rodea durante su desarrollo con tres membranas. El *amnios* que rodea y protege al embrión que flota en el líquido amniótico, el *alantoides* que hace de receptáculo de los desechos nitrogenados y que contiene aire para que el embrión pueda respirar, y el *corion* que rodea toda la estructura embrionaria y que está altamente irrigado de sangre, por lo que sirve realmente de órgano respirador. No hay que confundir ninguna de estas membranas con la externa del huevo, común como concepto de diseño con la de los huevos de los anfibios, y que con el paso del tiempo evolutivo se endurecería formando un cascarón.

Esta estructura no sólo blindaba al embrión contra la desecación, como ya se ha comentado, sino que permitía también su completo desarrollo dentro del huevo naciendo ya con su forma definitiva de adulto, lo que hacía que prosperara luego con mayor rapidez. Gracias a ello los animales amnióticos cambiaron de estrategia vital por contraste a la que tenían los vertebrados acuáticos -peces y anfibios-, optando por unas tasas de natalidad bajas (pocos huevos) unidas a un índice de mortalidad también

pequeño (éxito vital). Adaptan su volumen poblacional al tamaño máximo que puede soportar el ambiente -hábitat, agua o alimento- donde se encuentran. Incluso en ocasiones “se toman” un margen, asegurando a los individuos más recursos de los que pueden llegar a consumir, circunstancia que garantiza la gran estabilidad de sus hábitats y formas de vida. Tienen pocas crías, aunque bien cuidadas.



Huevo amniótico

Como uno puede imaginar el huevo amniota se consiguió a través de múltiples e inapreciables cambios, orientados por la selección natural. Los primeros no debían ser muy diferentes de los huevos de los peces o de los anfibios. De hecho los protorreptiles eran animales semiacuáticos, por lo que pondrían sus huevos protegidos por una membrana, en el agua o en sitios húmedos, rodeados de una mucosa segregada a su paso por el oviducto. Esta mucosa les ayudaba a combatir los efectos de una sequía ambiental. La tendencia sería hacia huevos más grandes, ya que este tipo de cigotos tenían mayor probabilidad de supervivencia.

El primer paso evolutivo por el que se iniciaba la nueva realidad del huevo amniótico se concretó con la aparición de un saco en la porción terminal del intestino del embrión, en donde se retenían sus desechos y la orina, con lo que se evitaba la pérdida de agua que esto supone en los anfibios. Este saco fue el alantoides, cuya membrana era muy rica en vasos sanguíneos mediante los cuales se comenzó a realizar el intercambio de gases CO_2 y O_2 con el exterior, haciendo cada vez menos necesario el desarrollo de branquias respiradoras.

Una primera invaginación de la membrana del alantoides rodeó el embrión formando el amnios, con funciones de protección similares a la que desarrolla la placenta en los mamíferos. Una segunda invaginación creó la tercera membrana, el corion, que rodeó a toda la estructura embrionaria: la cápsula amniótica con el embrión, el saco vitelino con el alimento y la cápsula alantoides, intercambiador de gases y agua.

El último paso evolutivo fue consecuencia de la transformación de la mucosa protectora exterior, la que se había generado en el oviducto. Quizás esta transformación ya comenzó a producirse en el propio oviducto, que generó una sustancia más fibrosa que la gelatina, dando como resultado una cobertura del huevo más resistente, por lo que a la vez tendría una menor necesidad de agua para su mantenimiento. Es decir, la cáscara progresivamente se iba mineralizando, elevando a la enésima potencia la protección del embrión frente a ambientes secos.

Muchos creen que el éxito del huevo amniótico se adelantó al abandono de los medios acuáticos por los adultos y que fue el inductor de la adaptación de los vertebrados a los medios terrestres, que se afirma y se diversifica con los reptiles: primero fue el huevo en la tierra y después le siguió el adulto.

La vida sobre la tierra seca exigió una adaptación del esqueleto que tenía que soportar el cuerpo sin ningún medio externo que le ayudara, como era el caso de los animales acuáticos. El nuevo esqueleto requirió cambios musculares, avances en la estructura de las vértebras y miembros, y coordinación del movimiento en las cuatro patas. Los reptiles con patas tienden a tener extremidades grandes y fuertes que les permiten caminar, correr, excavar, nadar o trepar. Además, las patas suelen ocupar posiciones más ventrales que en los anfibios, lo que les permite cargar más peso. Músculos más fuertes que inducían cambios en el aporte de sangre y, como resultado de esta nueva exigencia, cambios en el corazón, el pulmón y los vasos sanguíneos. El pulmón de los reptiles incrementó la capacidad de intercambio gaseoso, mientras que el corazón desarrolló un doble circuito separado junto con el sistema de arcos aórticos, estructuras más preparadas para llevar sangre oxigenada al cerebro.

La vida en tierra también trajo modificaciones en los sentidos, particularmente el oído, aunque no llegó a ser muy diferente al que ya disponían los anfibios, que utilizaban el arco hiomandibular para transmitir los estímulos al oído interno. Se modificó el paladar y la musculatura de la mandíbula, que desarrolló potentes inserciones en los huesos, lo que

facilitaba el agarre de las presas. Esta circunstancia sugiere a su vez modificaciones en el comportamiento alimentario, que posiblemente pasó de vegetariano a insectívoro. La alimentación requirió de una nueva habilidad para hacer frente al alimento seco, teniendo que humedecerlo con la saliva. El desarrollo de un cuello móvil facilitó los trascendentales movimientos de la cabeza necesarios para examinar los alrededores y capturar el alimento, coordinándolos a la vez con los movimientos del cuerpo. Estas habilidades de coordinación exigieron un mando central desarrollado. Así, el cerebro experimentó sustanciales avances, desarrollando la zona que recibe los estímulos de los ojos, oídos y miembros.

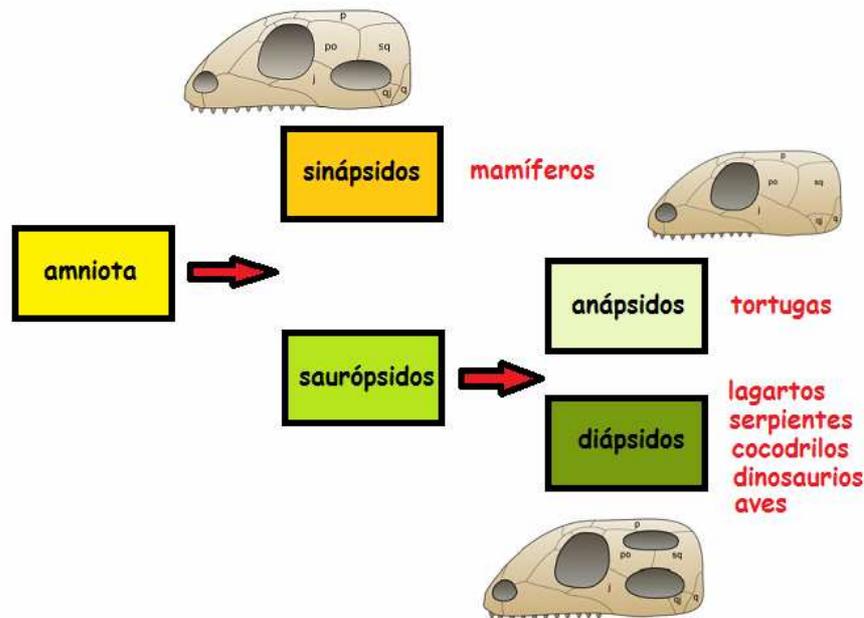
Pero lo más importante fue la conservación del agua corporal. Esto se realizó principalmente a través de la especialización del funcionamiento del sistema excretor. La orina de algunos reptiles contiene amoníaco y, en otros, ácido úrico. Los reptiles que viven principalmente en el agua, como los cocodrilos y caimanes, excretan la mayor parte de sus desechos nitrogenados en forma de amoníaco, un compuesto tóxico. Para ello, los caimanes y cocodrilos beben mucha agua, con lo que diluyen el amoníaco de la orina y les ayuda a expulsarlo. En contraste, muchos otros reptiles, sobre todo los que viven exclusivamente en tierra firme, no excretan amoníaco directamente. En vez de ello, lo convierten en ácido úrico. El ácido úrico es mucho menos tóxico que el amoníaco, así que no hace falta diluirlo mucho. Además, en estos reptiles el exceso de agua se volvía a absorber en la cloaca, convirtiendo la orina en cristales de ácido úrico que forman un sólido blanco y pastoso. La pérdida de agua era mínima.

Por otro lado, la impermeabilización de su piel ayudó en la economía de agua. Estaba queratinizada y cubierta por escamas que surgían como espesamientos y repliegues de la capa córnea de la piel, simples relieves epidérmicos que, aunque puedan recordar a las escamas de los peces, son totalmente diferentes. Al igual que los reptiles actuales, no dispondrían de glándulas sudoríparas, en la línea de minimizar por todos los medios la pérdida del agua corporal. Las únicas glándulas que tendrían les servirían para excretar sustancias de sabor y olor desagradable como estrategia de defensa, o feromonas con las que atraer a las hembras.

El “invento” del huevo amniota fue un duro palo para los anfibios. Los amnióticos tenían una baza de triunfo en su mano que utilizaron al máximo para encontrar nichos ecológicos y dominar en ellos. Es bien cierto que a partir de este hecho los hasta entonces dominantes anfibios comienzan una decadencia como clase, que llegaría a ser crítica a mediados del siguiente

periodo, el Pérmico, en donde hace unos 260 millones de años habían desaparecido la mitad de las especies anfibias, quedando 15 millones de años después sólo los residuales *temnospóndilos*.

Antes de acabar con este denso periodo del Carbonífero, avancemos un apunte filogenético que desarrollaremos en el capítulo del Pérmico: el camino evolutivo de los amniotas.



Fiología de los amniotas (Imágenes de Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Como podemos observar en la figura anterior, la filogenia evolutiva de los amniotas está basada en la forma y número de fenestras a cada lado del cráneo tras la órbita ocular. Las fenestras temporales hacen que el cráneo sea más ligero y permiten la inserción de músculos que accionan la mandíbula inferior.

Ya comentamos más arriba que los primeros amniotas en aparecer en el registro fósil debieron ser los anápsidos captorrínidos, aunque poco después, durante el período Carbonífero superior, hace unos 320 millones de años, emergieron los sinápsidos. Entre los más antiguos de estos últimos están los pelicosaurios *Archaeothyris* y *Clepsydrops*. Eran pequeños animales insectívoros y, aunque tuvieran apariencia de lagartos, no guardaban ninguna relación con ellos.

De todos ellos hablaremos en la crónica del próximo periodo, que comenzaremos a desarrollar en capítulo que sigue.

36. El Pérmico: Fin del Paleozoico

En el capítulo anterior nos despedimos del activo periodo Carbonífero. Hoy corresponde seguir adelante y adentrarnos en el desafortunado Pérmico.

Se extiende a lo largo de una prolongada etapa de casi 50 millones de años: desde los 299 hasta los 251 antes de hoy.



Este nuevo periodo debe su nombre a los extensos yacimientos de fósiles que corresponden a esta época y que se encuentran en las cercanías de la ciudad rusa de Perm, próxima a los Urales. Es el periodo en el que se consolidó el macrocontinente Pangea, circunstancia que trajo consigo una época de clima seco y extrema aridez en las tierras. No es de extrañar, por tanto, el éxito alcanzado a lo largo de estos años en la radiación de los reptiles, animales muy preparados para estas circunstancias.

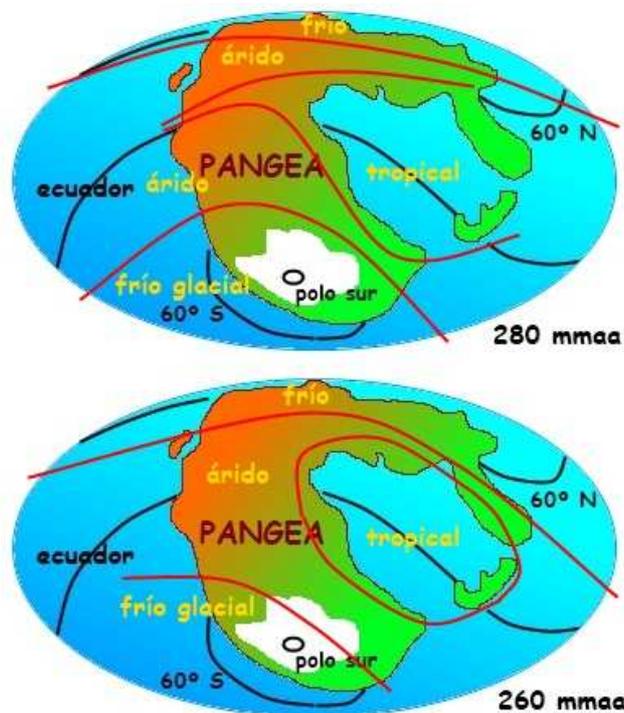
Este periodo finalizará con la mayor extinción conocida de especies. De ahí el apelativo que le he dado de “desafortunado”.

Como decimos, por fin se unieron todos los continentes errantes formando uno único, Pangea, que tomaría una posición norte-sur. Prácticamente iba de polo a polo y ocupaba aproximadamente una sexta parte de la circunferencia del ecuador. En su interior quedó cerrado el antiguo mar de Tetis. El océano que rodeaba a Pangea era único y tremendamente inmenso, llamado por ese motivo Pantalasa (del griego “*todos los mares*”). El nivel de las aguas era bajo como consecuencia de los glaciares del sur.

PÉRMICO TEMPRANO
270 MM AA



Pero su orientación geográfica suponía realmente una barrera continental que alteraba las corrientes marinas y las de aire. Las costas orientales estaban bañadas por flujos templados, mientras que en la costa oeste se iba implantando un clima más frío. El territorio era tan vasto y con un centro tan alejado del mar, que era muy difícil que llegaran las lluvias a su interior.



Evolución zonal del clima interior de Pangea durante el Pérmico en tan solo 20 millones de años.

La ausencia de relieves importantes no facilitaba la formación de nubes ni de lluvia y restaba fuerza a los monzones, que en aquella época se formarían muy potentes y con una gran energía, dadas las diferencias térmicas entre mar y tierra. Pangea llegó a ser un continente caluroso, seco y desértico, sobre el que se fue reduciendo la superficie ocupada por glaciares, quedando éstos confinados sobre grandes extensiones polares y en las cordilleras montañosas del oeste.

Las condiciones áridas y secas del centro continental provocaron la desecación de los pocos mares interiores que iban quedando. Un ejemplo de ello fue el mar de Zechstein, un mar interior extremadamente salado, que a lo largo del Pérmico cubrió una buena parte de Europa. Su progresiva desecación formó unas grandes cúpulas sedimentarias del mineral evaporita que preservaron los extensos campos de gas que actualmente se explotan en aquella zona. Otro caso de evaporación de mares interiores lo encontramos en Paradox Basin al sureste de Utah y Colorado, en Estados Unidos. Cubre un área de alrededor de 85.470 km², alcanzando los estratos sedimentarios en algunos lugares más de 4.600 metros de espesor.



Situación del mar de Zechstein sobre los territorios europeos actuales y vista general de una explotación minera de potasas en la zona de Paradox Basin (Foto: Nelson Minar, fair use)

El reino de las plantas

En tierra, las plantas evolucionaron siguiendo la batuta del clima. A medida que pasaban los años, las zonas húmedas y templadas iban disminuyendo, quedando limitadas al círculo costero del mar de Tetis. Los bosques de marisma, tan potentes en el Carbonífero, fueron también menguando y perdiendo parte de su variedad. Los *Calamites* y *Lycopodios*

fueron disminuyendo de tamaño, quedando como arbustos. Se vieron reemplazados progresivamente en sus territorios, ahora más áridos, por aquellas plantas que habían evolucionado haciéndose resistentes a las condiciones ambientales secas. Entre ellas, los helechos con semilla, que prosperaron en el hemisferio sur de Pangea, y las coníferas. El resultado fue que en esta época dominaron definitivamente las plantas gimnospermas, como lo son las propias coníferas, o las nuevas subclases que aparecen ahora por primera vez: los ginkos, que se supone derivaron de los helechos con semilla, y las cícadas.



Hoja de ginkgo y cono de cícada (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

El reino animal

La vida en los mares y océanos por lo general fue una continuación de la del Carbonífero. Grandes arrecifes y el dominio de los tiburones.

Mientras, en tierra firme los **insectos** continuaban su expansión, explotando las habilidades adquiridas con anterioridad. Eran animales muy versátiles, con seis ágiles patas, dos pares de alas retráctiles, unos sentidos desarrollados, como su vista y sus antenas “olfatorias”, una eficiente estructura bucal, un sistema digestivo que podía con todo y un exoesqueleto de quitina que les daba soporte y protección, lo que suponía una gran ventaja sobre otros animales herbívoros.

Ya sabemos que la concentración del oxígeno atmosférico se había incrementado significativamente durante el Carbonífero. Sin embargo, en el inicio del Pérmico comienza a experimentar un descenso. Estudiando los

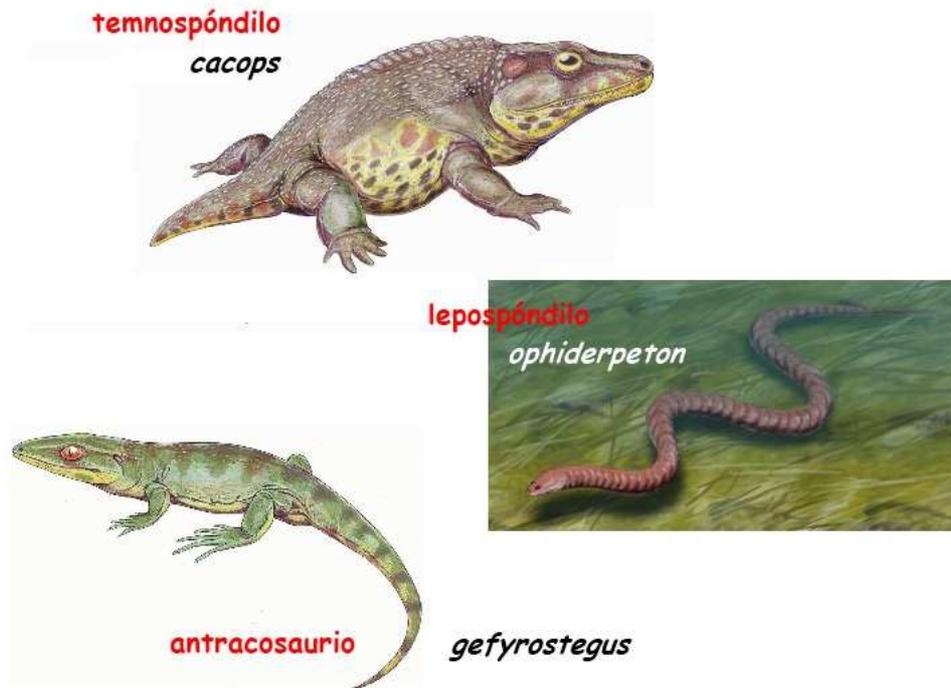
fósiles de las alas de los insectos de esta época se ha podido comprobar que muchos de ellos fueron variando de tamaño, creciendo y menguando según lo hacía la concentración atmosférica de aquel gas. Ello parece afianzar la hipótesis ya explicada en un capítulo anterior de que a mayor presión de oxígeno en la atmósfera mejor era la capacidad de oxigenación de los insectos, y por tanto más activo y eficiente era su metabolismo, lo que conducía al final a un gigantismo corporal.

Es en esta época cuando aparecen los más primitivos *coleópteros* -del griego *κολεός koleos*, “caja o estuche”, y *πτερον pteron*, “ala”-, los escarabajos, que en aquella época ocupaban el 90% del nicho de los insectos y que actualmente sigue siendo el orden dominante de esta clase, con unas 375.000 especies descritas. Los más ancestrales se caracterizaban por tener unos élitros -el par de alas anteriores modificadas por endurecimiento- decorados con unos patrones reticulados y una forma aplanada que sugiere que habitaban bajo la corteza de los árboles. Sin embargo, habrá que esperar hasta mediados del Triásico, hace unos 230 millones de años, para ver aparecer a los primeros escarabajos propiamente dichos, los cuales alcanzaron una enorme diversidad a finales del Jurásico, 95 millones de años después de que acabara el Pérmico.

Los *himenópteros* -del griego *ὑμεν hymen*, “membrana”, y *πτερον pteron*, “ala”- tales como las hormigas, abejorros, abejas y avispas, constituyen una de los órdenes hermanos de los coleópteros dentro de la clase Insecta. En la actualidad hay catalogadas unas 125.000 especies. Según algunos estudios filogenéticos, estos insectos también se habrían diversificado durante esta época, hace unos 300 millones de años. Los más primitivos fueron los sínfitos, cuyo nombre proviene del latín *symphytum*, que significa “unido”, y hace referencia a que no existe un estrechamiento que separe el tórax del abdomen, lo que se conoce como “cintura de avispa”. La anatomía básica de los sínfitos se ha mantenido prácticamente inalterada desde entonces. Estos primeros himenópteros se alimentaban de plantas, ampliando más adelante su dieta con la madera. Aunque haya que esperar para encontrar el fósil más antiguo de himenóptero hasta el Triásico, hace unos 230 millones de años, estos animales tendrán su gran desarrollo durante el periodo Cretácico.

Mientras las “cucarachas” imponían su baile en el Pérmico y los anfibios resistían a duras penas la sequía ambiental, los amniotas vertebrados que habían abandonado el Carbonífero como unos pequeños lagartos, disfrutaban plácidamente de la creciente aridez del clima ¡qué diferente debía ser lo que opinaban los anfibios! Estos últimos cada vez tenían

menos espacios vitales, las marismas costeras y las charcas de rivera donde habían aventurado su vida al salir del mar eran cada vez más escasas. Y bien sabían que necesitaban del agua y la humedad: sus pieles y sus huevos eran demasiado delicados. Los insectos, con sus exoesqueletos de quitina, habían podido iniciar la emigración hacia zonas terrestres del interior.



Anfibios del Pérmico temprano (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Pero los anfibios no, seguían atascados junto a las olas que rompían en las raíces de los manglares, cada vez más salinizados, cada día con un sol más crecido. Es cierto que las lluvias monzónicas eran terribles, pero casi ni se adentraban en el continente. Las montañas de las orogenias de los últimos millones de años atravesaban Pangea de costa a costa siguiendo la línea del ecuador, por lo que apenas oponían resistencia a las terribles nubes que se generaban en el mar y viajaban a velocidades de vértigo gracias a la diferencia de temperaturas entre agua y tierra. Los anfibios lo tenían difícil, la naturaleza ya no era su aliada y les empujaba a reducir sus poblaciones. Los órdenes abiertos en el Carbonífero con los temnospóndilos, lepospóndilos y antracosaurios, hacían lo que podían para sobrevivir en el estrecho anillo junto al mar de Tetis.

Sin embargo, el sol salía para todos. Les había costado, pero algunas plantas y animales habían salido favorecidos en el reparto de cartas de las mutaciones genéticas y la selección natural. Frente a la sequía... buenas soluciones: xerificación y quitinización, semillas duras y huevos con

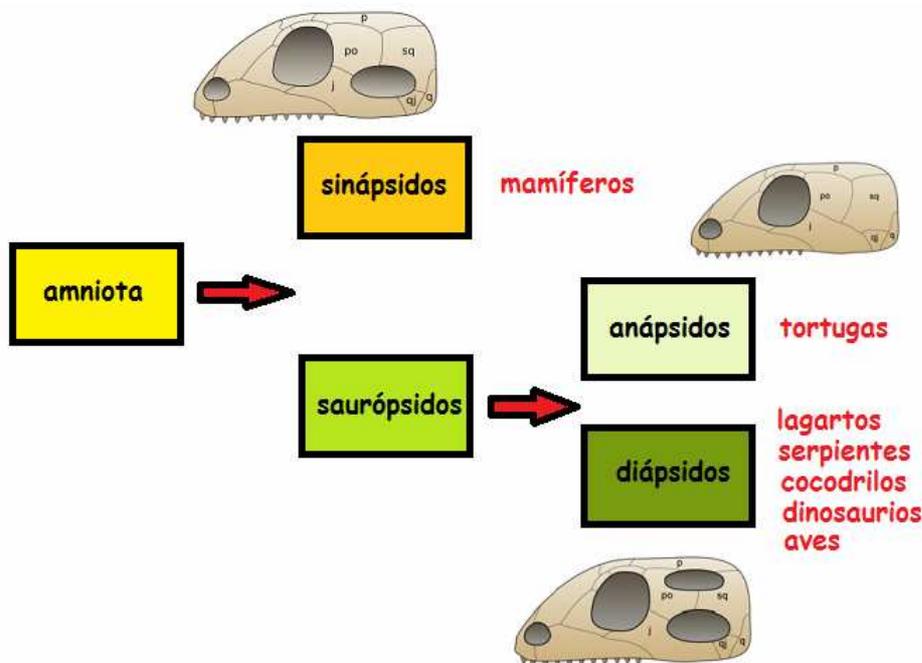
cascarón. Las tierras secas que dominaban los horizontes de los anfibios eran oportunidades para las plantas gimnospermas y para los tetrápodos amnióticos. Y fueron conquistando mayores latitudes penetrando tímidamente en los seis mil kilómetros del ancho de Pangea: primero las coníferas y familia, a su sombra y protección, los reptiles e insectos.

En esta aventura los escarabajos servirían de alimento a algunos sinápsidos lagartiformes, los pelicosaurios, que estaban comenzando una interesante especialización modelando a un pequeño grupo dentro de la familia de los amnióticos, camino de los mamíferos.

Poco después, el resto del club amniota, los saurópsidos, se diversificó en dos nuevas líneas evolutivas que les llevaría, por un lado, a las actuales tortugas, y por otro lado, a los dinosaurios, con sus nietos las aves, y al resto de reptiles actuales, lagartos, cocodrilos y serpientes.

Como estamos viendo, el periodo Pérmico contempló el desarrollo de una panoplia completa de animales y la aparición de los grandes herbívoros y carnívoros.

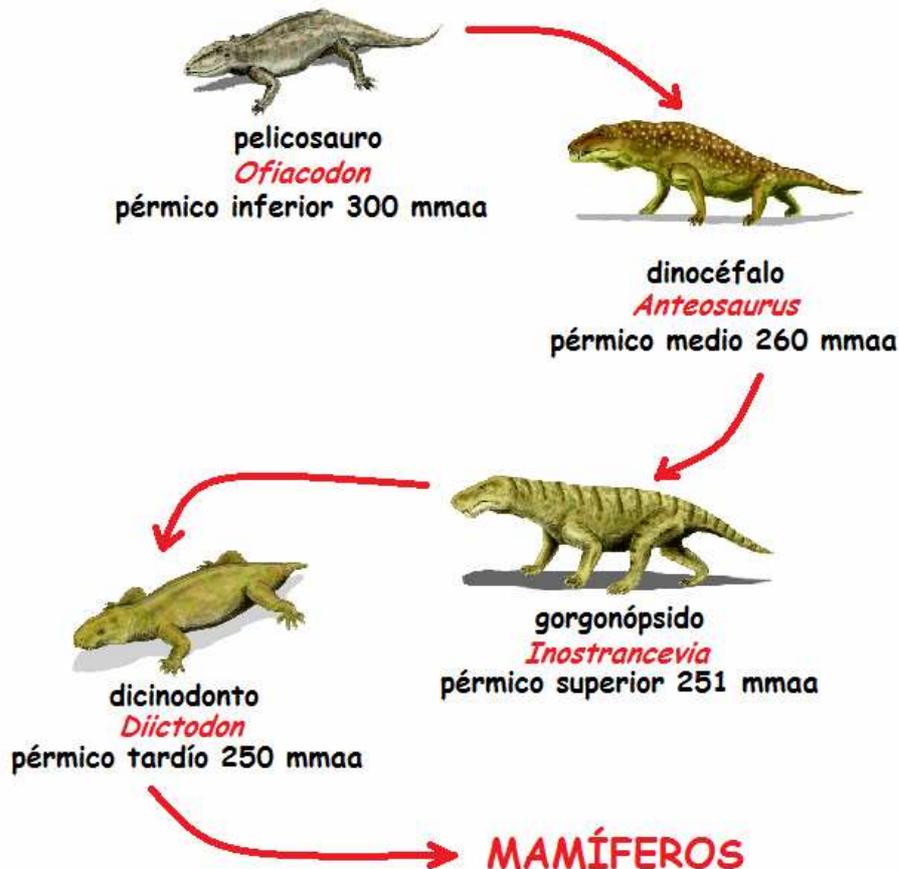
Antes de comenzar con un poco de más detalle la evolución de los amniotas durante el Pérmico, repetimos, como ayuda para la memoria, su libro de familia con el que cerrábamos el capítulo anterior del Carbonífero.



Veamos cómo continúa la saga.

Hemos comentado un poco más arriba que a medida que avanza el Pérmico los *mamiferoides pelicosaurios* se fueron diversificando hacia un nuevo orden de tetrápodos, los **terápsidos**, que durante la fase media del Pérmico fueron los que dominaban el mundo de los reptiles y que dieron lugar, casi en la frontera con el Triásico, a los “mamíferos” más ancestrales: los cinodontos.

En el camino, los terápsidos adoptaron muchas modificaciones corporales. Los menos avanzados, los **dinocéfalos**, los “*cabeza terrible*”, aún compartían características con los pelicosaurios, pero ya habían modificado su hueso ilíaco y tenían miembros más rectos, lo que evidentemente agilizaría y daría más potencia a su marcha. Los huesos de la cabeza eran gruesos, e incluso a veces con un cuerno, lo que posiblemente les daba una ventaja a la hora de competir por la comida o el apareamiento. Todos los dinocéfalos se caracterizaban por tener incisivos entrelazados, permitiendo un ajuste más cortante entre los dientes superiores e inferiores. La alimentación era variada, pudiendo ser carnívoros, herbívoros u omnívoros.



El camino de los terápsidos (A partir de Wikimedia, GNU FDL 1.2)

El siguiente paso en la serie fósil nos lleva a los **gorgonópsidos**, los “*cara de Gorgona*” -terrible monstruo femenino-, de efímera vida ya que desaparecieron a finales del Pérmico, de los que diremos que pudieran haber sido los primeros animales con sangre caliente. A su lado se desarrollaban los **dicinodontos**, los “*doble diente de perro*”, con un potente esqueleto de huesos cortos y robustos.

Hacia finales del periodo, hace 260 millones de años, estos últimos dieron paso a los **cinodontos**, los “*dientes de perro*”, aún reptiles mamiferoides, de los que definitivamente evolucionaron a finales del período Triásico, hace unos 200 millones de años, los primeros mamíferos, tras haber ido recogiendo los cambios evolutivos de sus ancestros.

Andaban ya más erguidos que los reptiles, con sus patas en posición más ventral. En su evolución se observa cómo van perdiendo el número de huesos que conforman la mandíbula inferior, y cómo el cráneo se va reforzando en aquellos puntos que servían de soporte a un músculo facial masticador cada vez más potente. Los dientes se iban especializando, de forma que no sólo cogía y desgarraba la presa para tragarla, sino que comenzó a masticar, lo que facilitaría la digestión y mejoraría la eficiencia alimentaria. En su mandíbula superior se aprecian ya agujeros que bien podían ser el paso de nervios y vasos sanguíneos que actuaban sobre la musculatura facial, característica exclusiva de los modernos mamíferos. Disponía ya de un segundo paladar, el que separaba los conductos olfativos de la boca, con lo que podía comer y respirar a la vez. Los huesos que va perdiendo en la mandíbula inferior se van utilizando para mejorar la audición, habilidad que le obligaba a tratar un mayor número de datos externos y por tanto a favorecer una coevolución de su cerebro. Es probable que fueran, al menos parcialmente, animales de sangre caliente ya que empiezan a observarse cubiertas de pelo que les habrían ayudado a mantener la temperatura.



Representación artística del cinodonto Oligokyphus (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Todos estos cambios iniciales tienen su consolidación en los futuros mamíferos. Trataremos de ello en algún capítulo dedicado al periodo Jurásico.

Volviendo a la otra rama de reptiles, los **saurópsidos**, hay que comentar que a mediados del Pérmico ya se observan anápsidos primitivos mientras que hay que esperar al final del periodo para que aparecieran los diápsidos.

Antes de acabar con el cuadro de los reptiles, merece la pena hacer mención sobre uno de ellos que, después de salir a tierra, volvió al medio acuático, como harían más tarde las ballenas o las focas, donde cazaba peces pequeños y otros animales acuáticos. Fue el primero reptil que lo hizo. Se trata del *Mesosaurus*, posiblemente de la familia de los anápsidos, que tenía una constitución esbelta y una forma alargada, lo que se traducía en una buena hidrodinámica que le permitía nadar a gran velocidad. Además, las patas terminaban en manos palmeadas que tenían función de remo. La cola era estrecha y larga, perfectamente adaptada para sus necesidades, y tal vez contase con una aleta.

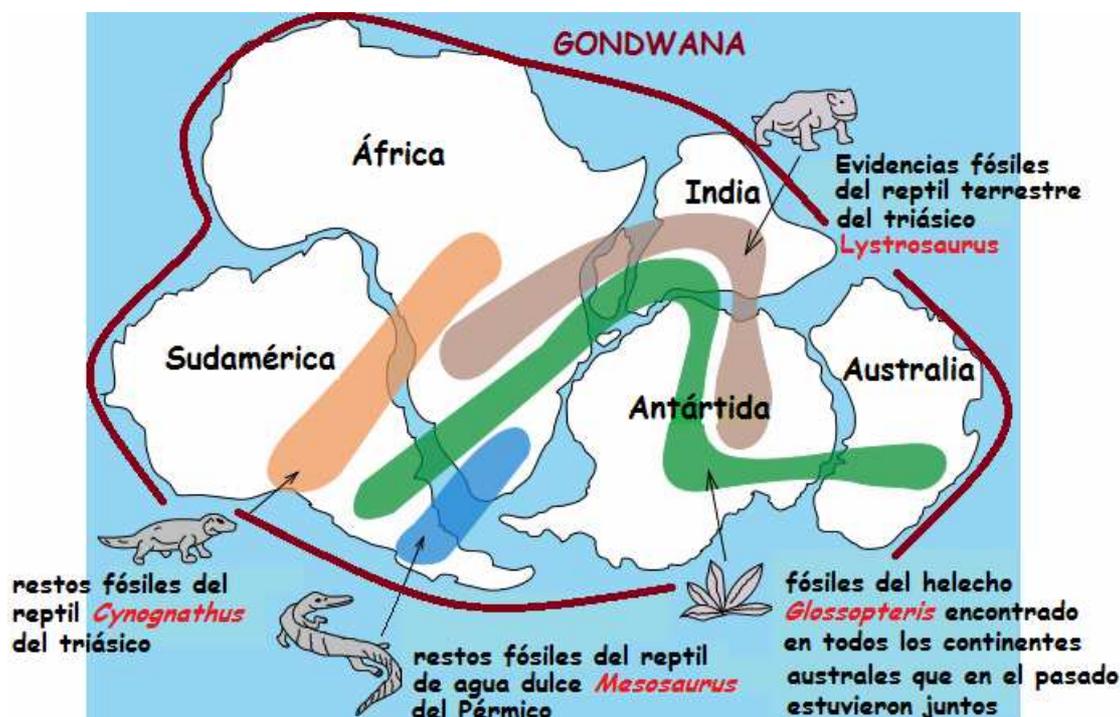


Mesosaurus (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

¿Y por qué hago una mención especial a este reptil? Porque hay que agradecer a *Mesosaurus*, conjuntamente con la genialidad de pensamiento del científico alemán Alfred Wegener, el que en 1911 se planteara la teoría de la deriva continental. Wegener observó que pequeños fósiles pertenecientes a un reptil de agua dulce se repetían en rocas del Pérmico en

localidades tan distantes hoy en día como Brasil y Sudáfrica, pero en ninguna otra parte del mundo. Este dato le hizo sospechar que tal vez estos territorios hubieran estado ligados en un pasado remoto. Cuando consiguió reunir otras pruebas, Wegener expuso al mundo científico su teoría sobre la deriva continental.

La sospecha se había iniciado al comprobar que los perfiles de los continentes actuales parecían encajar unos con otros, a pesar de que les separasen grandes masas oceánicas. Por ejemplo, el golfo de Guinea en la costa oeste de África encaja perfectamente con la tripa panzuda de Brasil. Al hacer el ejercicio de completar el rompecabezas observó también que existían cordilleras con la misma edad y la misma clase de rocas en distintos continentes que, según él, habían estado unidos. E incluso pasaba lo mismo con depósitos de carbón o morrenas de glaciares que se repetían a uno y otro lado del mar. Y aún hay más. Las pistas que dejaban los fósiles, entre los que se encontraban los de algunos animales terrestres tales como reptiles -aquí entra *Mesosaurus*- o los de algunas plantas, que por sí solos hubieran sido incapaces de haber atravesado océanos, apuntaban hacia estos mismos patrones.



La “iluminación” de Wegener sobre el antiguo perfil de Gondwana
(Wikimedia, dominio público)

Eran tales las evidencias que no dudó en plantear que durante el periodo de vida de estas especies había existido un único continente, unión de todas

las tierras. Si habían estado unidas y ahora estaban separadas sólo cabía la posibilidad de que se hubiera comportado como un ensamblaje de balsas pétreas navegando a la deriva. Más tarde, con el desarrollo de los estudios paleomagnéticos (sobre la orientación de las moléculas de minerales ferromagnéticos, cristalizadas según la orientación del eje magnético terrestre en el momento de su solidificación) se remachó la comprensión del mecanismo de la deriva de placas continentales, siendo hoy una teoría científica más que comprobada.



*Concepción artística de lo que pudo ser una escena en el periodo Pérmico
(Foto: Sam Noble Museum of Natural History, Oklahoma, fair use)*

A pesar de los grandes movimientos geológicos, el mundo parecía idílico después de haber soportado la tensión provocada por Pangea. La ilustración anterior permite relajar nuestros ojos sobre un paisaje fluvial de finales del Pérmico, donde los bosques de coníferas y helechos con semilla dan cobijo a unos pelicosauros con la vela expuesta al sol, que se alimentan de los peces que consiguen capturar. En el centro de la imagen unos dicinodontes esperan su oportunidad. Un nuevo amanecer con el sol pintando las primeras luces sobre las cúspides. Un día más como cualquier otro de los ya vividos.

Y de pronto, empezó el Armagedón. El misterio se desvelará en el siguiente capítulo.

37. La gran extinción del Pérmico-Triásico

En el capítulo anterior contemplábamos en todo su esplendor cómo durante el periodo Pérmico asentaban sus bases aquellos que más tarde, a lo largo del Mesozoico, dominarán la escena, al menos de forma más aparente y mediática: los reptiles y los mamíferos. No lo tuvieron fácil.

Nada ni nadie se podía imaginar la que se avecinaba. Aquel día, un día cualquiera durante el Pérmico, había amanecido igual de caluroso y seco, como venía sucediendo desde hacía unos millones de años. Aquel día iba a comenzar la cadena de sucesos que estrangularían la vida hasta posiciones próximas a la desaparición. Fueron entre 5 y 10 millones de años terribles - incluso algunos lo estrechan a tan sólo un millón y medio- que cambiaron la faz de la Tierra.

El resultado lo evidencian los datos paleontológicos disponibles, que nos permiten asegurar que el 96% de las especies marinas del Pérmico desaparecieron hace 251 millones de años, en el límite entre el Pérmico y el Triásico. Desaparecieron para siempre los trilobites, mientras que los corales rugosos, que tanto habían colaborado en la construcción de los arrecifes, fueron brutalmente diezmados. Menguaron las especies de los amonites, braquiópodos y equinodermos. Deberíamos esperar diez millones de años a que la recolonización de los medios marinos volviera a activarse.

En cuanto a la fauna de tierra firme, se estima que desaparecieron un 77% de los vertebrados, con una mayor supervivencia entre los de pequeña talla.

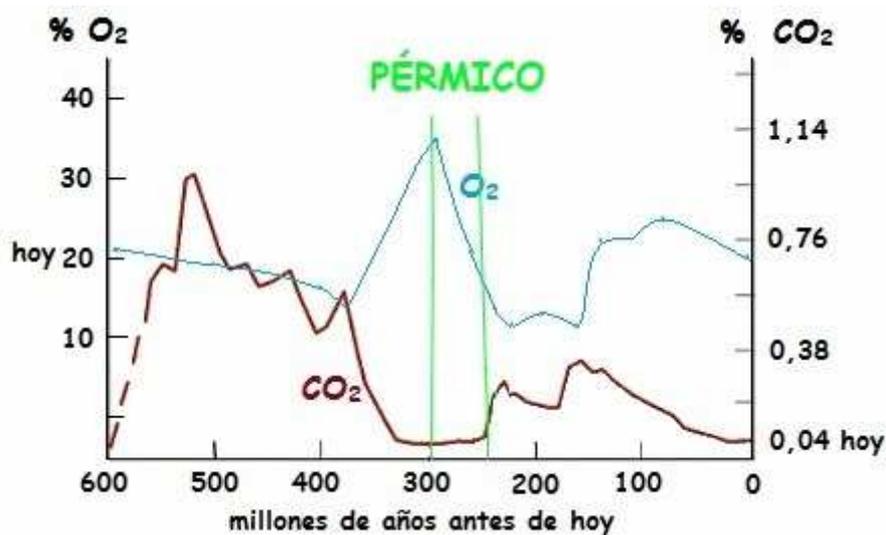
Las plantas soportaron mejor la crisis, aunque los helechos con semilla se extinguieron y a las gimnospermas les costó un largo periodo el poder reaparecer. Lo consiguieron gracias a la capacidad de sus semillas para enquistar la vida hasta encontrar condiciones más propicias. No se generó carbón durante el periodo, a diferencia de lo ocurrido a lo largo del Carbonífero, lo que hace pensar que la práctica totalidad de las plantas turberas desaparecieron.

Una evidencia de la crisis de los bosques la encontramos en la proliferación de restos fósiles del *Reduviasporonites* durante el momento

en el que se da la extinción. El análisis de la firma geoquímica del mismo indica que se trata de un hongo cuyo nicho ambiental era la madera en descomposición. Las piezas encajan para indicar que los bosques de Pangea fueron aniquilados por la extinción masiva, encontrando este hongo un entorno idóneo para su desarrollo.

El hecho fue tan importante que se establece este evento como el que marca el final del Paleozoico, cuyo nombre significa con mucha precisión “*vida antigua*”. Después de él vendría la vida nueva del Mesozoico, la “*vida intermedia*”.

Ya se ha comentado en el capítulo anterior que la forma y posición geográfica de Pangea había provocado un progresivo calentamiento, de forma que los bosques tropicales se constriñeron al cinturón litoral del mar de Tetis. Esta circunstancia ralentizó en las plantas verdes su exuberante función clorofílica del Carbonífero, lo que a su vez arrastró una disminución del O₂ atmosférico.



En la figura anterior se observa esta caída durante el Pérmico, que influyó también en el grado de oxigenación de las aguas. La presencia de oxígeno atmosférico, que había llegado al 35% a finales del Carbonífero, descendió paulatinamente durante todo el periodo, de forma que cuando ocurrió la extinción era del 16%, un poco menor que el actual 21%. Este nivel no era un inconveniente para la vida en sí, ya que la cantidad absoluta de oxígeno en aquellos momentos corresponde al que hay en la actualidad a una altura de unos 3.000 metros sobre el nivel del mar, donde no hay problemas para la subsistencia. No obstante, la biosfera iba en camino hacia un mayor estrés térmico y oxigénico, sobre todo en las calientes aguas del mar que,

al soportar una menor presión de vapor de oxígeno en su superficie, disolverían una menor cantidad de este gas.

Corrían estos tiempos, hace 260 millones de años, cuando comenzó un día a alterarse el mar próximo a la costa, en una zona cercana a lo que ahora es la provincia china de Emeishan. Manchas blanquecinas y verdosas teñían sus aguas, mientras que turbios remolinos iban agitando las olas. Animales muertos flotando y olor a sulfhídrico que alejaría del litoral a los que vivían en tierra firme.

Posiblemente la deriva del pequeño continente de China Sur hacia el norte hizo que la franja de choque con la placa del mar de Tetis se fragmentara y agrietara, dejando paso libre al magma. En esta franja de posición ecuatorial se habían estado acumulando en los últimos cien millones de años capas y capas de carbón.



Situación geográfica sobre el mapa de Pangea pérmico de los dos eventos volcánicos que iniciaron la extinción masiva de hace 251 millones de años. Sobre el mar de Tetis una flecha roja indica la deriva continental del subcontinente China Sur.

Inicialmente emergieron unas columnas tremendas de vapor de agua, cada vez en mayor número y volumen, que llenarían la zona de espesas y calientes nubes, hasta un punto de no retorno en que las tensiones de los bordes de las grietas no pudieron contener la presión del magma, y reventó. Toneladas de material candente, que se estima en un millón de kilómetros cúbicos de lava, se pusieron en contacto con el agua del mar, produciendo una evaporación masiva que duró tan sólo unos pocos miles de años. Millones de metros cúbicos de CO₂, ClH y SO₂ fueron lanzados a la atmósfera. Por poner unos números que nos hagan percibir la magnitud de las emisiones, entraron en la atmósfera 170 trillones de toneladas de

dióxido de carbono y 18 trillones de toneladas de ácido clorhídrico. El cielo, cubierto de espesas nubes durante muchos años, no permitía el paso de la vital luz solar, a la vez que un torrente de lluvia ácida drenaba la atmósfera de los gases de los volcanes. El paso del magma a través de los depósitos de carbón produjo aún más CO₂ y metano del que la propia erupción volcánica arrastraba. Como consecuencia, se incrementó el efecto invernadero y la temperatura de la Tierra subió aún más.

Se sabe que debió pasar algo así gracias al estudio de las rocas de aquel momento. Presentan una atípica desviación al alza en la relación de los isótopos del carbono ¹²C/¹³C, que llegó a un máximo del 42 ‰ a finales del Pérmico. Los seres vivos metabolizan mejor el carbono 12, ya que para ello se precisa el empleo de menos energía que con el carbono 13, simplemente por tener una menor masa atómica. En ellos, por tanto, la relación entre ambos isótopos -¹²C/¹³C- es superior que en el resto de la naturaleza. El hecho de que en las rocas de finales del Pérmico se observe una alteración del ciclo del carbono terrestre indica que en aquel momento se estaba liberando mucho carbono de origen orgánico, lo que corrobora el episodio volcánico a través de los depósitos de carbón.

La capa de roca que se fosilizó después de la erupción muestra la extinción de diferentes tipos de vida, lo cual vincula claramente esa actividad volcánica con una importante catástrofe ambiental.

El incremento de las temperaturas y la disminución del oxígeno atmosférico provocaron también una mayor disminución del contenido de este gas en las aguas, en las que ya empezaron a dominar las bacterias que metabolizaban azufre en la diaria competencia con los organismos de metabolismo aeróbico. El resultado fue el incremento de la concentración de sulfhídrico, acidificando las aguas.

Otro tipo de bacterias, las arqueas metanógenas *Methanosarcina*, colaboraron también al incremento del efecto invernadero y en la acidificación de los mares. Se ha observado una gran proliferación de las mismas en los momentos anteriores a la extinción. La teoría⁽⁵⁵⁾ explica que a finales del Pérmico se tiene la evidencia de que estos organismos adquirieron nuevos genes por transmisión horizontal a partir de otros microbios. Estos genes aumentaron su capacidad de absorber el carbono orgánico existente en el agua y por tanto espolearon su función generadora de metano. El efecto invernadero se incrementó en el planeta, pero además la absorción de este metano por las aguas

incrementó en las mismas el nivel de dióxido de carbono disuelto, añadiendo un nuevo vector de acidificación.

Realmente la naturaleza vivía tiempos difíciles, aunque lo iba soportando en el filo de la inestabilidad. Pero fue en vano, ya que entre unos cinco y diez millones de años después se produjo otra crisis volcánica aun de mayores proporciones, que duró aproximadamente un millón de años, y en la que muchos animales pudieron desaparecer en apenas unos cincuenta mil años, con la mortandad disparándose masivamente a partir de un periodo radiodatado en hace 251 millones de años.

El lugar: en el borde septentrional de Pangea, en tierras que ahora son parte de Siberia. No se trató de una gran explosión, sino de la efusión rápida de grandes cantidades de lava caliente y poco viscosa a lo largo del siguiente millón de años. Por las formas características que forma la lava al solidificarse en estos casos, que recuerdan a una escalera, se denominan con la palabra sueca *trapp* (que significa eso mismo, escalera). Y por eso a esta enorme erupción se la conoce en todo el mundo como *siberian trapps* que a veces se ve erróneamente traducido al castellano como *trampas siberianas*, pero en realidad quiere decir *escaleras siberianas*.



Zona de influencia de las Siberian trapps sobre un mapa actual

Se estima que la erupción proyectó entre uno y cuatro millones de kilómetros cúbicos de lava basáltica, cubriendo unos siete millones de kilómetros cuadrados de terreno (por comparar, la totalidad de Europa es de 10 millones de km²), y al igual que había sucedido en el episodio de Emeishan, emitió a la atmósfera una cantidad aún indeterminada, pero extraordinariamente grande, de gases de efecto invernadero entre los que se encontraba el CO₂ y el metano. El clima de la Tierra dio una vuelta de tuerca más hacia una mayor sequía y calor. Se estima que tras esta segunda erupción la temperatura media subió unos cinco grados centígrados.

La mayor temperatura produjo un par de efectos combinados. Por un lado, favoreció la autocombustión de grandes masas de carbón que se habían generado desde el Carbonífero. Esto aún produjo más CO₂ y disminuyó aún más la concentración de oxígeno en la atmósfera, que llegó a ser del 16%. Las aguas de los mares se calentaron, liberando los depósitos de metano congelado próximos a la costa, con lo que se incrementó aún más el efecto invernadero, lo que reforzó aún más la desviación del carbono hacia su isótopo 12, como realmente se observa.

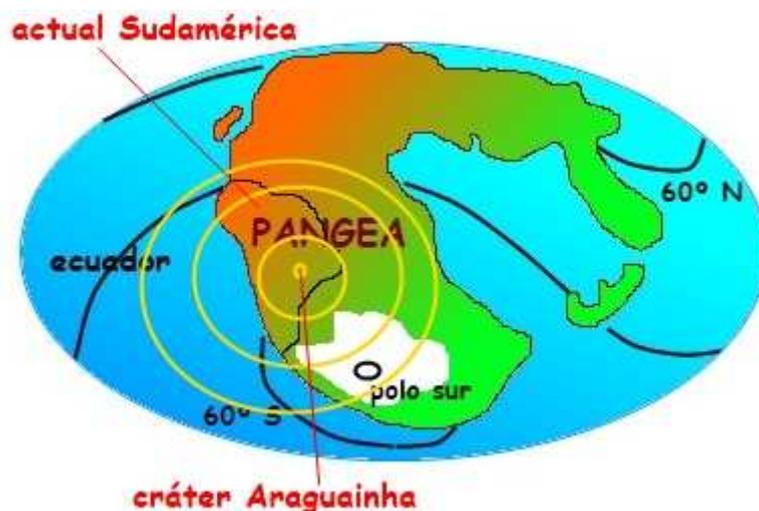
La acidificación de los mares que se venía arrastrando desde el episodio Emeshian por el incremento del CO₂, con este segundo golpe, más súbito, intenso y prolongado que el primero, debió ser brutal. Duró unos 10.000 años según se ha podido comprobar⁽⁵⁶⁾ estudiando rocas de aquellos fondos marinos que actualmente están al descubierto en los Emiratos Árabes Unidos.

Inmensas extensiones de bosques ardieron bajo el empuje de la lava, generando una capa de nubes asfixiantes repletas de cenizas que, al depositarse en el suelo, ahogaron aún más a la vida.

Con el calor, la anoxia oceánica se agravó, lo cual hizo que las bacterias sulfurosas prosperaran con mayor facilidad en las aguas, con su metabolismo generando grandes cantidades de sulfuro de hidrógeno que se iba liberando a la atmósfera. Las costas se volvieron inhabitables e incluso pudo afectar a la capa de ozono.

Como vemos, realmente se había producido a lo largo de unos pocos millones de años una sucesión de **fenómenos en avalancha** sobre una naturaleza ya estresada. Seguramente resultó activado inicialmente por la erupción de las escaleras siberianas, pero que se amplificó enormemente debido a las otras circunstancias que hemos comentado.

Se ha especulado mucho sobre si realmente la extinción pudo verse reforzada por la caída de un meteorito, tal como veremos que sucedió con la desaparición de los dinosaurios y otra fauna y flora hace unos 65 millones de años. Parece claro que no hubo un evento de este estilo con influencia de alcance planetario.



Situación del impacto que produjo el cráter de Araguainha sobre el mapa de Pangea durante el Pérmico. Como ayuda visual se ha dibujado el perfil del actual territorio de Sudamérica.

Sin embargo, recientemente se ha podido constatar⁽⁵⁷⁾ la existencia de un paleocráter de 40 kilómetros de diámetro (cuatro veces y media inferior al producido por el mencionado meteorito que aniquiló a los dinosaurios) en la frontera de los estados de Mato Grosso y Goiás en Brasil, llamado el cráter Araguainha. La radiometría data el cráter en la misma época en que se producía la extinción supermasiva del Pérmico-Triásico. No obstante, dado el tamaño del meteorito se estima que la energía liberada en el impacto no pudo tener efectos a nivel planetario. Pero evidentemente debió ser la puntilla durante esta época apocalíptica.

También se especula con la posibilidad de que otro choque de un meteorito pudiera iniciar el episodio de las Siberian trapps. En la Tierra de Wilkes, en la Antártida, se encuentra un cráter de impacto de unos 500 kilómetros de diámetro: ¡no fue una bagatela! El problema es que su datación en el tiempo no es muy precisa, aunque se cree que cayó hace unos 260 millones de años. Si esto fuera así, coincidió en la época del inicio de la gran mortandad. Los científicos que lo han descubierto especulan⁽⁵⁸⁾ con la posibilidad de que las ondas sísmicas inducidas en el choque afectaron las antípodas del punto de impacto, lugar donde en aquel momento se situaba

la actual Siberia. ¿Pudo ser el gatillo que disparó el largo episodio de masivo vulcanismo en aquel territorio?

Y hasta aquí esta triste historia, la de la tercera y más catastrófica extinción del Fanerozoico. Aunque mientras respirara una pequeña chispa de vida, mientras fuera posible la existencia de un abrigo en donde refugiarse y resistir, habría que pensar que quedaba espacio para la esperanza. Y así fue. Podemos imaginar a algún superviviente, asustado, hambriento, mirando por la estrecha rendija de su madriguera que le protegería de las cenizas y los vientos huracanados y calientes, observando un terrible mundo en negro y rojo. Pero a la vez fuerte, hábil, valiente y dispuesto a seguir adelante... ¡qué remedio! El riesgo fue modelando sus hábitos, y acertó, porque poco a poco fue resarcido por la inclemente naturaleza. Su prole logró proseguir en el laberinto del fuego.

Sobre la infernal tierra de finales del Pérmico e inicios del Triásico, la vida se mantuvo. La escasa vida que daría apelativo a la siguiente era, el Mesozoico, sugerente nombre que proviene del griego *meso/μεσο*, que significa “entre”, y *zoon/ζωον*, que significa “animal”. La vida intermedia entre la tragicomedia iniciada en el Cámbrico y el juvenil avanzar del Terciario/Cuaternario por donde mucho más tarde nos íbamos a mover los humanos. En el próximo capítulo iniciaremos el relato de la recuperación.

38. Periodo Triásico

En el anterior capítulo habíamos dejado a nuestra querida biosfera un tanto deteriorada, por decirlo de una forma suave. Sobre nuestro planeta habían cabalgado los cuatro jinetes del Apocalipsis. Más del 90% de las especies marinas desaparecidas. En tierra se habían ido para no volver jamás del 70% de las especies animales. Las plantas habían resistido un poco más, aunque también quedó muy limitada su presencia. No obstante, dejábamos la anterior entrada con una pincelada esperanzadora puesta sobre algún pequeño animal que, como los galos de Astérix, supiera resistir el ambiente más hostil que había existido desde los infernales años del Hadeico.

La gran mortandad es el hito biogeológico frontera entre el Paleozoico y el Mesozoico, entre los periodos Pérmico y el que recién nos disponemos a estrenar: El Triásico. Este se extendió en una franja temporal entre hace 251 y 200 millones de años.



Como hemos comentado, comienza el Mesozoico o Edad de los Reptiles. Su primer periodo, el Triásico -del latín *trias* que significa “tríada”, grupo de tres-, fue así nombrado en 1834 por Friedrich Von Alberti para hacer honor a los tres tramos más generales de depósitos sedimentarios de este periodo que suelen aparecer juntos.

Durante todo el Triásico se mantuvo Pangea unida, lo que supuso una continuación del clima árido del Pérmico. A mediados del periodo comienzan a consolidarse los dinosaurios, y a finales aparecen los primeros mamíferos verdaderos. Había comenzado tras una catástrofe de extinción masiva y finalizará de la misma manera.

Retomemos por un momento las imágenes dejadas a finales del Pérmico: el mundo cubierto de cenizas, el fuego de las lavas rodeando a la Vida, los asfixiantes gases volcánicos que dificultaban hasta grados extremos la respiración... pocos lugares se escapaban del extremo estrés que este escenario produciría. En el mar, prácticamente se partía de cero. En tierra la situación era menos mala aunque, sin lugar a dudas, muy crítica.

Las más que adversas condiciones tras las extinciones se prolongaron durante muchos años. Las inestabilidades habían hecho acto de presencia, lo que impulsaba continuos y reiterados desequilibrios en los ciclos del carbono, del oxígeno, en los ciclos de calentamiento/enfriamiento y en otros factores geofísicos. Los ecosistemas se iban recuperando y degradando al hilo de estos desequilibrios, lo que afectaba de igual manera a las especies que habitaban en ellos. Parecía que se restablecían y al poco volvían a menguar. Cinco millones de años se necesitaron para que se normalizara el medio ambiente de forma que pudieran recuperarse los ecosistemas y conseguir un régimen más estable. Tras este punto de inflexión la Vida volvió a ser sostenible.

No es difícil hacer un ejercicio de imaginación y transportar nuestra propia existencia a aquellos días, en un intento de empatizar con las pocas especies que sobrevivían malamente ¿cómo lo harían? ¿cómo lo habiéramos hecho nosotros, imaginarios retroviajeros de la máquina del tiempo?

Ante todo habría que protegerse frente a las inclemencias del tiempo, tarea que dependía de nuestra habilidad e imaginación. Segundo, habría que acomodar en gran manera los patrones de alimentación. En tercer lugar habría que ponerse en manos del destino evolutivo y esperar que nuestro organismo fuera conducido exitosamente por la selección natural.

“¿Quién pudo sobrevivir? La respuesta, curiosamente, fue muy parecida tanto en el mar como en tierra: aquellos que fueran los mejores respirando, aquellos que pudieran aguantar bajos niveles de oxígeno, sofocantes tasas de dióxido de carbono y una sucia mezcla de gases tóxicos. Aquellos que podían jadear y respirar a la vez, que se movían y permanecían activos, los que vivían en agujeros, en madrigueras, en el lodo, en las marismas, en sedimentos, aquellos que buscaban su comida en lugares donde nadie lo quería hacer.

Algunos pocos animales lo consiguieron, y gracias a ellos estamos nosotros aquí. Y por ello es significativo el que los primeros animales

terrestres que recuperaron la naturaleza tras la Gran Mortandad fueran los Lystrosaurus” -de la familia ya mencionada de los terápsidos dicinodontes-, “horadores de madrigueras, de fuerte pecho con forma de barril, diafragma muscular, paladar óseo, amplios conductos para el aire con cornetes refrigeradores. Emergieron resoplando y jadeantes de sus enrarecidas madrigueras para colonizar los continentes vacíos como si fueran prolíficas ardillas”.

¡Qué imagen más vívida del momento nos dejó el bioquímico y escritor inglés Nick Lane en su libro “*Life Ascending!*”



*Representación artística de nuestro héroe Lystrosaurus georgi
(Wikimedia, GNU FDL 1.2)*

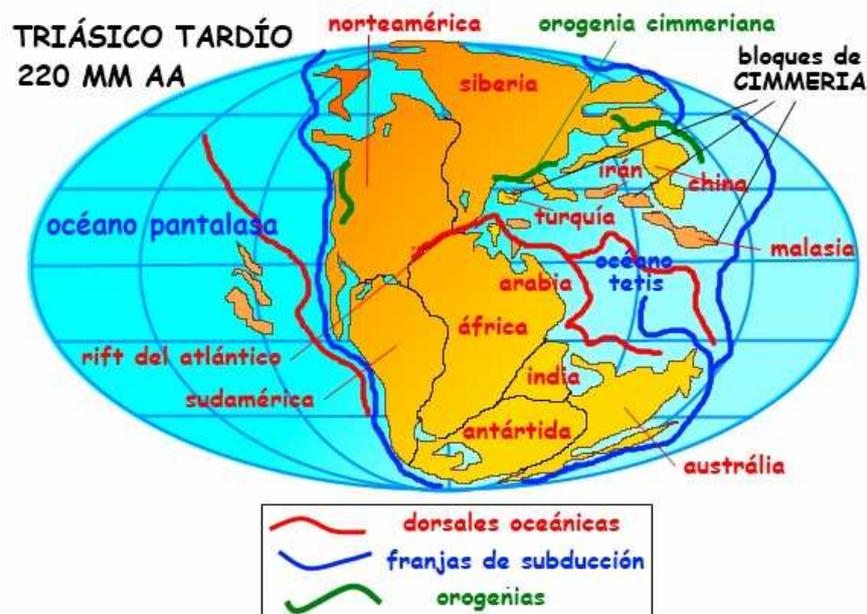
El listrosauro es famoso porque habitó de forma dominante, y por unos cuantos millones de años, el sur de Pangea. Por lo menos una especie del género, posiblemente la menos especializada, sobrevivió a la extinción masiva del Pérmico-Triásico y, en ausencia de depredadores y de competidores por el alimento, prosperó y fue el ancestro a partir del cual se diversificaron varias especies dentro de su género, de forma que resultó ser el grupo más común de vertebrados a lo largo del Triásico temprano, durante el cual el 95% de los vertebrados terrestres fueron listrosauros. Las causas nos las ha explicado muy bien Nick Lane.

Desde el fondo de un agujero, protegidos del calor, de la acidez de las lluvias contrastando con la aridez y alto pH de las cenizas, adaptando su metabolismo tanto a la actividad diurna como a la nocturna, lo que le permitía más autonomía y radio de acción a la hora de buscar el alimento, encaminándose poco a poco hacia el magnífico subproducto llamado

sangre caliente. Desde el fondo de la madriguera la Vida retomó el protagonismo con extremas dificultades.

¿Cuál fue el escenario climático que se encontró?

Recordemos que, como resultado de los geológicamente convulsos sucesos de fines del Pérmico, los niveles de CO₂ eran unas seis veces superiores a los actuales, lo que implicaba un efecto invernadero potente y elevadas temperaturas. El oxígeno, por el contrario, se situaba en el entorno del 16%, muy inferior al 21% actual. Podemos decir que el ambiente general climático de la Tierra era cálido y seco, con matices, resultado de la especial distribución de tierras y mares.



Pangea durante el Triásico tardío. Se ha sobreimpreso los perfiles de los actuales territorios.

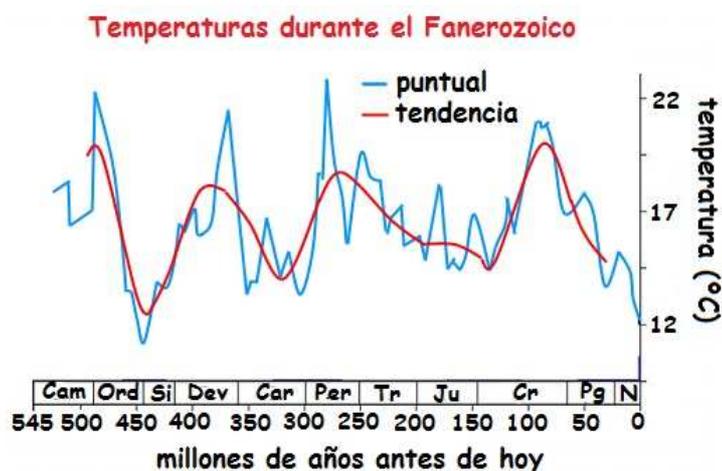
Si observamos el mapa anterior vemos que la Tierra se agrupaba prácticamente en un sólo continente, Pangea, como un anillo que rodea un mar interior, Tetis, y que es rodeado a su vez por un inmenso océano, Pantalasa. Bajo las costas de Pantalasa se subducían las placas oceánicas.

En el mar de Tetis el fenómeno era menos intenso, a pesar de que se estaban activando las dorsales oceánicas que comenzaban a introducirse en pleno continente, iniciando un rift, una gran brecha, que a finales del periodo sería el inicio de la desintegración de Pangea, en norte y sur, y que más tarde formaría el moderno océano Atlántico central. El océano de Tetis estaba siendo barrido casi horizontalmente, de sur a norte, por el

continente lineal de Cimmeria (una larga franja que hoy corresponde a la comprendida entre Turquía y Malasia), que se había desgajado de las costas sur de Tetis e iba a llegar a colisionar sobre las costas del norte, presionando sobre Eurasia en donde se generaron diversas orogénias. Los niveles de los mares eran bajos con relación a lo que iba a venir en un futuro, a pesar del deshielo de los glaciares de Gondwana.

Las tierras emergidas eran muy extensas, y su amplitud sobre el círculo del ecuador se aproximaba a los siete mil kilómetros. Las distancias al mar eran inmensas. Esto hacía que la influencia que ejercen las masas de agua amortiguando las variaciones de temperaturas fuera mínima, lo que se traducía en un clima altamente estacional, con veranos e inviernos extremos. La lejanía del mar creaba condiciones de intensa aridez, aunque en el entorno de algunos lagos endorreicos interiores posiblemente se mitigara la sequía y las temperaturas fueran más suaves.

Hay estudios basados en las relaciones isotópicas del oxígeno en fósiles de conodontos -ya mencionados en el capítulo 28 cuando hablamos del periodo Ordovícico- que parecen establecer que las temperaturas en aquel momento eran extremas: La superficial oceánica en los trópicos podía ser de 40°C y en las zonas tropicales emergidas de 50 a 60°C.



En la franja ecuatorial, debido a las diferentes inercias térmicas de agua y tierra, la desigualdad de temperaturas entre aguas oceánicas y zonas del interior provocaría fuertes vientos que arrastrarían masas de aire saturado de humedad marina. Y al igual que pasó en el Pérmico, la inexistencia de grandes montañas que favorecieran la formación de nubes disminuyó en gran manera la fuerza de las lluvias, que no lograban penetrar hasta lo más profundo del continente. Estas circunstancias hicieron que incluso en estas zonas ecuatoriales y tropicales, donde se

hubiera esperado la existencia de bosques monzónicos, abundaban los desiertos y los bosques secos tropicales.

Las temperaturas extremas de los veranos extendieron un ambiente cálido sobre las regiones polares, en las que posiblemente pudo afianzarse con mayor probabilidad de éxito la vida animal y vegetal.

De todas formas, se debe completar el encuadre climático diciendo que, a pesar de que las circunstancias paleoclimáticas aseguraban unas temperaturas extremas y cálidas, la tendencia, que seguiría en el Jurásico e inicios del Cretácico, fue hacia la disminución de las temperaturas medias.

La biota del Triásico

En la franja tropical del planeta no había animales terrestres complejos porque su metabolismo les hacía imposible sobrevivir en las condiciones de extrema temperatura. En esas regiones tampoco había peces o reptiles marinos, sólo había algunos moluscos. Se extendía una gran zona muerta a lo largo del planeta. Las escasas especies de animales vivían en las regiones polares, que eran las únicas que podían proporcionar refugio del calor agobiante.



La biota a inicios del Triásico, a partir de Yadong Sun⁽⁵⁹⁾

Concretamos ahora la situación en las aguas marinas. Aquí la Gran Mortandad de finales del Pérmico se había llevado por delante a los trilobites, a los foraminíferos, a los briozoos y a algún tipo de coral. Viejos conocidos que ya no volvieron más. El hueco dejado fue colonizado tras

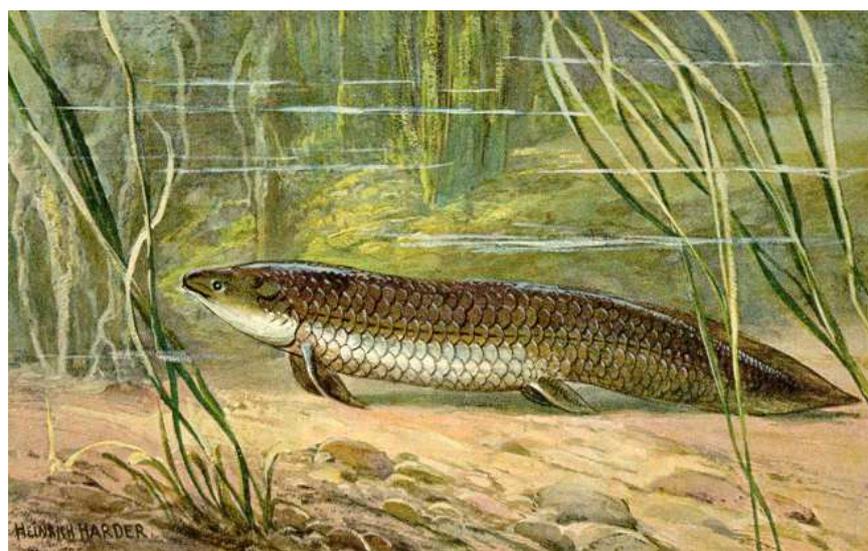
grandes esfuerzos por los moluscos, ya fueran bivalvos, ammonoideos, gasterópodos o braquiópodos, los cuales dominaron en los mares y océanos del Triásico.

Los arrecifes formados por esponjas, algas calcáreas y corales rugosos desaparecieron como tales, dando paso en las zonas tropicales del océano de Tetis a los arrecifes de corales pétreos hexacorales. Los primeros de ellos se formaron en aguas relativamente profundas. Eran pequeños, de menos de 3 metros, y estaban contruidos por pocos tipos de organismos. A finales del Triásico crecieron en tamaño y biodiversidad al establecer una relación simbiótica con algas.

En las aguas también sobrevivieron los vertebrados: peces y nuevas especies de reptiles que decidieron volver al mar, como mucho más tarde lo harían los mamíferos ballenas o delfines.

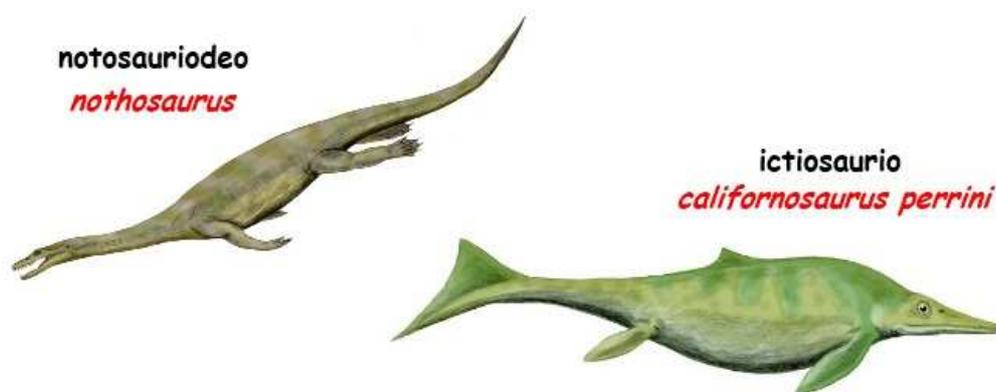
Entre los primeros, los peces, inicialmente predominaron los *paleoniscoideos*, que eran una especie intermedia entre los de esqueleto cartilaginoso y los de esqueleto óseo, y que al final fueron los precursores de los peces con aletas radiadas, entre los que en la actualidad se encuentran los familiares teleósteos: lenguados, merluzas, salmones, truchas y muchísimos más. La tendencia general evolutiva llevó a la producción de colas más cortas y escamas más delgadas, lo que suponía para el animal un progresivo incremento de su agilidad.

De los *peces pulmonados* se conservan fósiles del *Ceratodus*, de notable difusión en el Triásico, perdurando durante el resto del Mesozoico.



Representación artística del Ceratodus (Wikimedia, dominio público)

A medida que iban pasando los años, la biodiversidad se iba enriqueciendo en los mares. Las oportunidades de alimentación que suponían peces y moluscos facilitó la aventura de los reptiles. Los escasos *reptiles marinos* que pudieron sobrevivir a la guadaña de la gran extinción de finales del periodo fueron repoblando los mares a lo largo del Triásico inferior. Los primeros aventureros serían los notosauriideos, parientes próximos de los placodontos. Tenían un perfecto diseño hidrodinámico y se desplazaban aleteando con las paletas de sus cuatro extremidades. Fueron sustituidos progresivamente por los *ictiosaurios*, otros reptiles marinos que adoptaron formas más parecidas a los peces e incluso a los modernos delfines. Seguramente este nuevo diseño resultó más eficaz, ya que sobrevivieron hasta hace 90 millones de años.



Reptiles marinos del Triásico (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

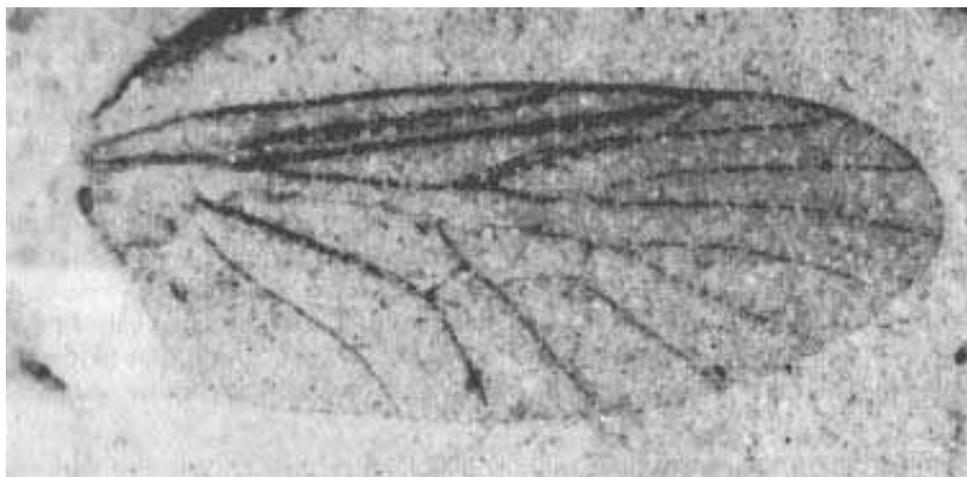
Los insectos

Antes de hablar de los reptiles con mayor extensión vamos a adelantar lo concerniente al mundo de los insectos, los cuales también habían podido atravesar la terrible frontera de la extinción de finales del Pérmico demostrando una gran capacidad de resistencia. Durante el Triásico, la morfología de estos animales, tanto en las diversas fases larvarias como en el estado de adulto, se diversificó, simplificándose los procesos de metamorfosis y ampliando su repertorio de nutrientes, lo que hizo que ocuparan un variado rango de nichos ecológicos. Los escarabajos, moscas y avispas son hijos de esta época. Sabemos que los primeros, los *coleópteros*, se afianzaron en sus formas más modernas a mediados del Triásico, hace unos 230 millones de años.

En la misma frontera, hace 250 millones de años, aparecen ya los primeros *dípteros*, las moscas, insectos que habían mutado su segundo par de alas cambiándolos por unos balancines que funcionan como giróscopos. El fósil

más antiguo que se conoce de díptero data de 10 millones de años más tarde. Se trataría de un ala de *Grauvogelia arzvilleriana* hallada en un yacimiento fósil de Francia. Se encontró en un terreno arcilloso y de rocas sedimentarias superficiales correspondientes a un delta fluvial y salobre. Este orden de los insectos surgió en ambientes húmedos, y conforme sus individuos conquistaban ambientes más secos su recubrimiento en la fase de pupa -estado intermedio entre larva y adulto- se hizo más impermeable, al endurecerse el exoesqueleto de la última fase larvaria. Se cree que esta pupa resistente pudo ser lo que permitió a los insectos recuperarse rápidamente tras la crisis del Pérmico, dado que dentro de estas cápsulas podían aguantar en una ralentizada fase “pupal” las condiciones adversas durante mucho tiempo.

Hace 220 millones de años se diversifican los *nematóceros*, que significa “cuerno filiforme” haciendo referencia a sus antenas largas y esbeltas. Entre ellos se encuentran los conocidos mosquitos patilargos que aparecen en otoño. Cuarenta millones de años después, ya en el Jurásico, se diversificaron los *braquíceros*, las verdaderas moscas.

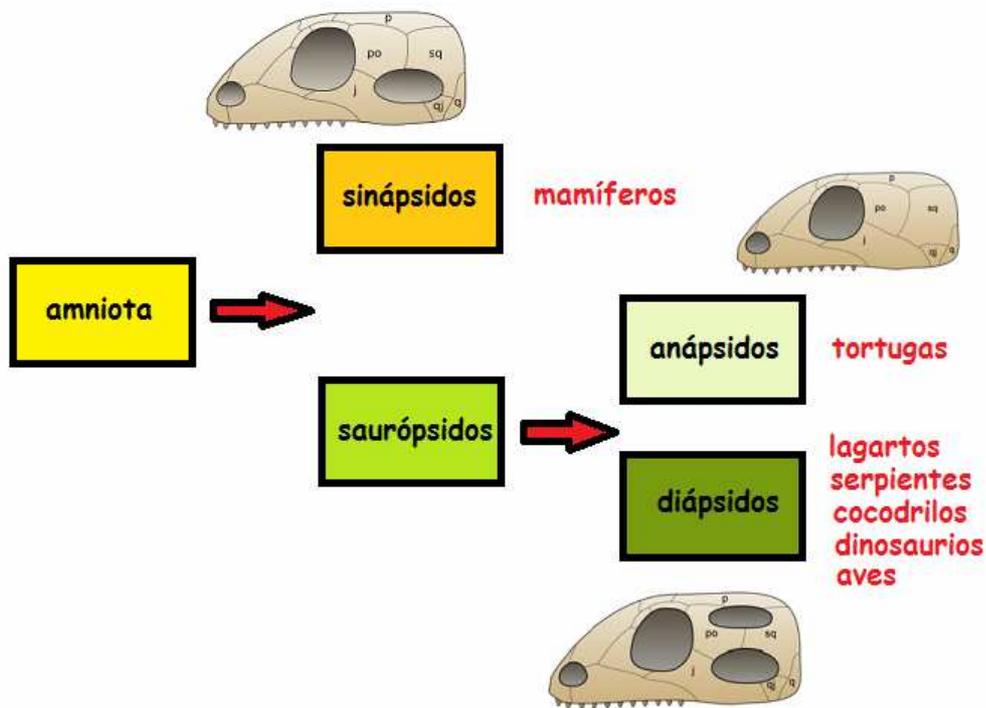


Primer fósil conocido de díptero, ala de Grauvogelia arzvilleriana
(referencia: W. Krzemiński et al.⁽⁶⁰⁾)

Débiles y fuertes: Mamíferos y reptiles

Al comienzo del capítulo habíamos ya comentado que en tierra, incluyendo los hábitats lacustres, la Gran Mortandad había alterado la existencia de los reptiles. Su presencia estaba muy mermada, y casi podríamos decir que en su mayoría estaban representados por los *mamíferoides terápsidos*, un orden de los sinápsidos, y algunos pequeños *saurópsidos* semiacuáticos. Pronto se inició entre ellos una lucha por el poder.

Con objeto de facilitar el seguimiento de estas familias, repetimos de nuevo la imagen con la que cerramos el capítulo dedicado al periodo Carbonífero: el plano filogenético general de los amniotas.



La competencia entre ellos, mamiferoides y saurópsidos, se decantó en un principio por los primeros. Ya hemos hablado de *Lystrosaurus*, a medio camino entre reptil y mamífero, y casi omnipresente en todo el territorio de Pangea. Posiblemente fue contemporáneo del pequeño -15 centímetros-norteamericano *Adelobasileus*, el más antiguo protomamífero conocido cuyos fósiles son de hace unos 225 millones de años. Algunos mamiferoides posiblemente habían desarrollado ya un metabolismo que les situaba próximos a la vida de sangre caliente. La extinción de los grandes herbívoros y los carnívoros dinocéfalos había dejado vacíos sus nichos ecológicos, nichos que fueron ocupados por los supervivientes. Y, a pesar de que la presión de la selección natural los iba empujando hacia tamaños corporales más pequeños, jugaron un importante papel, ya que fueron los precursores de los mamíferos verdaderos, que evolucionaron a partir de ellos a finales del Triásico.

Pero los *terápsidos*, los futuros mamíferos, fueron al poco superados, con lo que se demostraba que la sangre caliente aún no tenía realmente ventajas competitivas en el mundo seco y árido de la Pangea triásica. Poco a poco se nos venía encima la época del gran esplendor de los dinosaurios dueños del Jurásico, el siguiente periodo, ya que los que realmente estaban

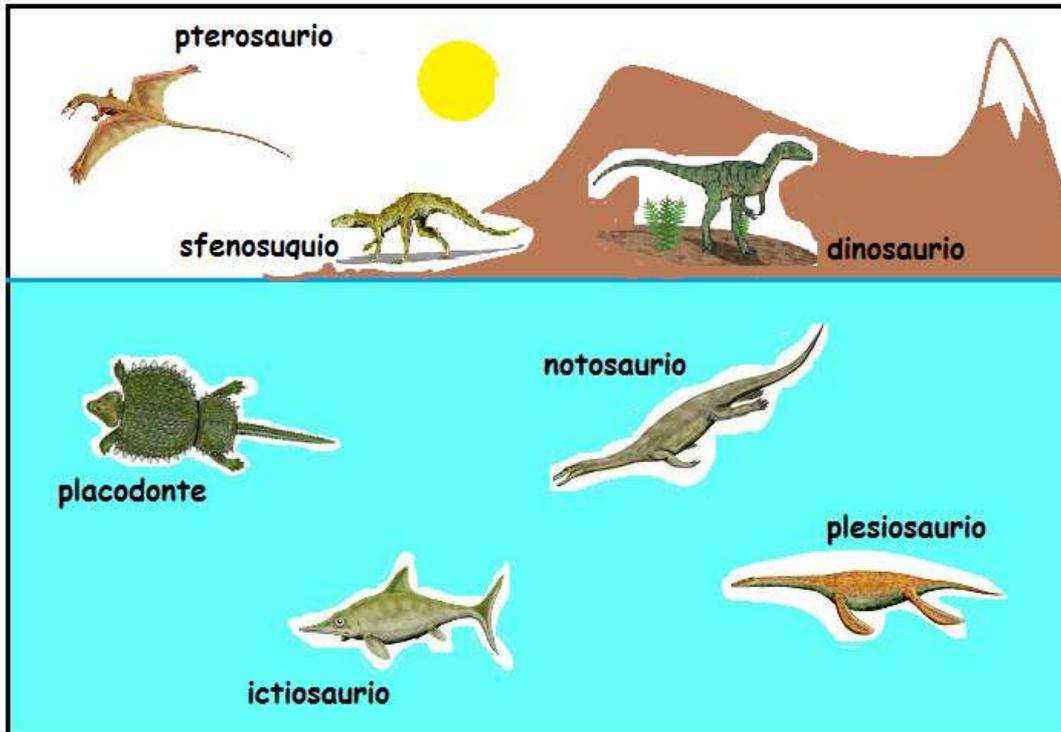
preparados para estas condiciones ambientales eran los animales de la rama hermana amniota, los de sangre fría, los saurópsidos. En aquel momento eran pequeños reptiles carnívoros acuáticos que progresivamente fueron ocupando también los espacios abandonados por sus hermanos, los *arcosauromorfos*, que habían desaparecido. De forma que fueron esos, y en especial las diversas familias y órdenes de los *arcosaurios*, los que tomaron rápidamente un papel más relevante, dominando la superficie terrestre en este periodo, y relegando a los terápsidos a un papel secundario. Ya les llegaría su época a estos mamiferoides.

El esquema siguiente dibuja el árbol genealógico de los triunfadores, los saurópsidos diápsidos. En él los *tecodontos* ocupan una posición paralela a los arcosaurios, ya que fueron un orden muy primitivo de ellos.



Esta línea basal de los primeros animales saurópsidos formó un grupo muy diversificado, que incluía varios animales semiacuáticos con forma de cocodrilo, algunos primitivos y torpes carnívoros también semiacuáticos que convivían compitiendo junto con otros carnívoros terrestres, más grandes y activos, también pequeños herbívoros blindados, de desplazamiento bípedo, y frágiles cuadrúpedos antecesores de los cocodrilos, además de muchas especies más.

Con el tiempo, hacia mediados del Triásico, aparecieron unos nuevos órdenes de saurópsidos que habrían evolucionado a partir de los primitivos. Llegaron a colonizar todos los medios. *En el agua*, con un abanico variado de especies como los *ictiosaurios* semejantes al delfín, el falso lagarto *notosaurio*, los *placodontes* semejante a las tortugas, y los *plesiosaurios*, parecido a una foca de largo cuello.

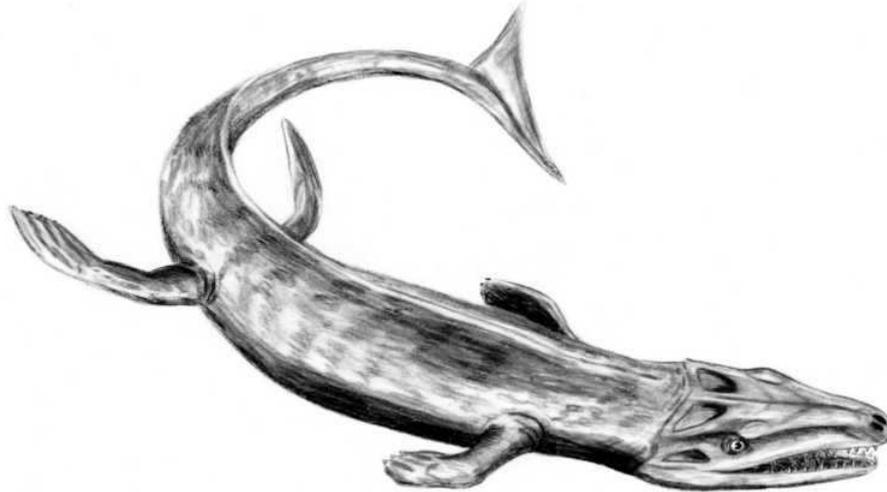


Saurópsidos del Triásico (a partir de Wikipedia)

Fuera del agua hacía tiempo que se había diversificado un nuevo grupo cuyos miembros manifestaban un par de características evolutivas nuevas que consistían, una, en un pequeño agujero a ambos lados del cráneo entre los orificios nasales y los ojos, y otra, en que los dientes estaban incrustados en alvéolos de la mandíbula. Estos detalles caracterizaban a los *tecodontos*, arcosauros muy primitivos que hacen que esta familia de reptiles se diferencie del resto de primos. Este grupo incluía tres órdenes distintos, el de los ancestros de los *cocodrilos*, el de los *dinosaurios* -de sus hijas las aves- y el de los *pterosaurios*.

Primer orden arcosaurio: los cocodrilos. Hace unos 240 millones de años, en la familia arcosauria se desgajó la subclase de los *crurotarsos*, que llegaría hasta los cocodrilos y que fue la que realmente dominó durante lo que quedaba de Triásico. La presión de los “cocodrilomorfos” debió ser tremenda y pudo condicionar el desarrollo corporal de los dinosaurios que en esta época, como hemos comentado, eran de tamaño pequeño o medio. De hecho se han encontrado fósiles de dinosaurios *Herrerasaurus* con marcas de dientes de crurotarsos. Los primeros especímenes de dinosaurios se mantuvieron hasta casi el final del Triásico en un segundo plano, historia casi semejante a la que habían sido forzados a sufrir los mamíferos terápsidos. Sin embargo la crisis de finales de este periodo, que comentaremos más abajo, dejó en el agua muchos nichos vacíos de

antiguos depredadores. Esto último, unido al progresivo incremento del potencial de los dinosaurios en tierra, hizo que durante la frontera temporal con el Jurásico los cocodrilomorfos fueran colonizando el medioambiente acuático, en donde permanecen actualmente en su gran mayoría.



El crurotarso Dakosaurus maximus (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Segundo orden arcosaurio: los dinosaurios. Su irradiación comenzó hace unos 230 millones de años, considerándose los géneros más antiguos el *Herrerasaurus* o el *Eoraptor*. El primero era de un tamaño medio, pudiendo alcanzar una longitud entre tres y seis metros, mientras que *Eoraptor*, más pequeño, podía llegar hasta el metro. Ambos debían ser bípedos y depredadores en su medio. Los dinosaurios se diversificaron rápidamente, ocupando cualquier tipo de nicho posible, lo que da idea del potencial y eficiencia de estos reptiles.

No obstante no hay que valorar demasiado este hecho que podemos escenificar en la frase “*los dinosaurios fueron unas máquinas abocadas a dominar su entorno*“. No. Los dinosaurios tuvieron un proceso evolutivo extremadamente condicionado por dos episodios de extinciones masivas de especies y alejado de lo que podemos pensar fue una evolución progresiva gracias a su natural preponderancia. El primer golpe del azar climático se dio hace 230 millones de años en lo que se conoce como el “Evento Pluvial del Carniense” durante el cual un incremento prolongado de las lluvias alteró las especies vegetales y por tanto la “despensa” de los dinosaurios, entre otros animales. El segundo golpe del azar fue el de finales del Triásico provocado, parece ser, por un fuerte episodio de vulcanismo.

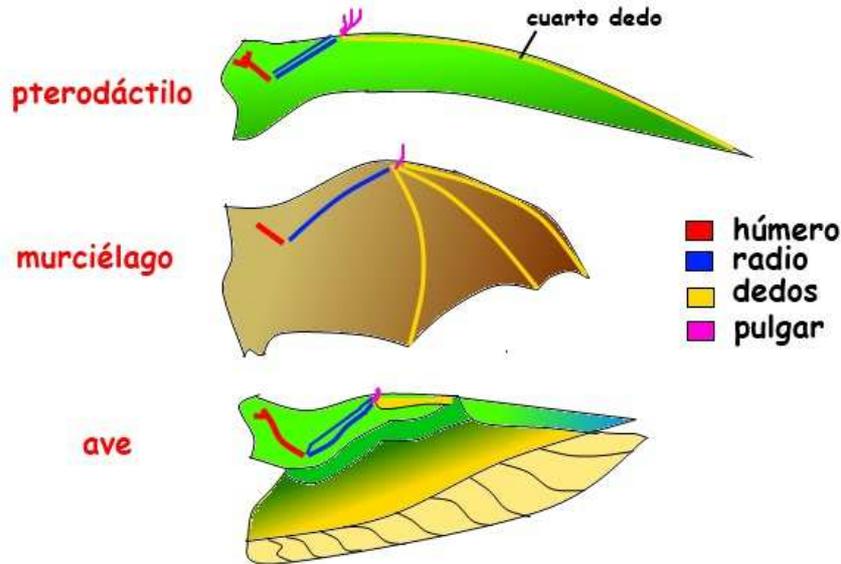
Podemos decir que la “suerte” permitió a unos prometedores especies del Triásico el dominar el panorama durante los dos periodos siguientes.

A pesar de que Eoraptor se ha considerado hasta ahora como el posible ancestro común de todos los dinosaurios, nuestro conocimiento de la historia fósil es necesariamente cambiante. Se cree tener evidencias⁽⁶¹⁾ claras del que pudo ser el primer dinosaurio, o pariente cercano, a partir de fósiles datados hace 243 millones de años, unos 15 millones antes de lo que se creía hasta ahora -cronología corroborada también por otros estudios⁽⁶²⁾-. Se tratan de seis vértebras y un hueso de los brazos del animal, encontrados en Tanzania cerca del lago Malawi –antiguamente Nyasa-. Por eso a este dinosaurio se le ha llamado *Nyasasaurus parringtoni*. Tendría cerca de 80 centímetros de alto y hasta tres metros de largo, con una cola de 1,5 metros. Probablemente pesaba entre 20 y 60 kilos. Además de poder ser el dinosaurio más ancestral conocido, su importancia radicaría en que es un sólido apoyo a la hipótesis que establece que este superorden de animales evolucionó en la parte sur de Pangea: los dinosaurios son del sur.



Fósiles del Nyasasaurus parringtoni (Sterling J. Nesbitt et al.⁽⁶³⁾)

Tercer orden arcosaurio: los pterosaurios. Los animales de este orden aparecieron poco después que los dinosaurios, hace unos 225 millones de años. Fueron los primeros vertebrados en volar. Aunque su origen filogenético es muy discutido, se conocen fósiles ya datados en el Triásico tardío, hace unos 210 millones de años. Corresponden a un esqueleto casi completo de un *Eudimorphodon*.

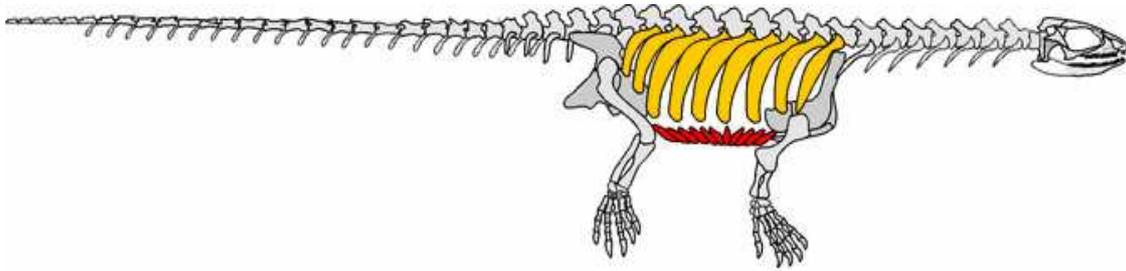


Comparación de las alas en distintas especies voladoras. Pterodáctilo es un género del orden Pterosauria.

El pterosaurio no era un dinosaurio, animales estos últimos de los que evolucionó la rama lateral de las aves. Tenía cabeza grande, cuerpo pequeño y alas largas y estrechas terminadas en tres garras diminutas y un hipertrofiado largo cuarto dedo. Las alas estaban soportadas por este cuarto dedo y un hueso extra en el antebrazo. A finales del Triásico ya eran capaces de realizar vuelos de una cierta duración, cubriendo distancias inusitadas hasta el momento. Poseía un fino recubrimiento de pelo, lo que pudiera ser un indicador de un metabolismo con sangre caliente. Sin lugar a dudas este tipo de metabolismo es el que necesitaba para poder realizar los prolongados sobreesfuerzos que le exigía el ejercicio de batir las alas en vuelo.

La subclase anápsida: las tortugas. Para completar la imagen de los reptiles saurópsidos nos queda hacer un apunte sobre su subclase anápsida de la que actualmente sólo continúan entre nosotros las tortugas. Hace 240 millones de años vivía, por lo menos en el lago alemán de Vellberg, un animal con aberturas diápsidas en su cráneo, al que se lo considera un posible vínculo entre los ancestros más primitivos y los ejemplares de tortugas actuales. En un arrebato de originalidad los científicos le han nominado como “*abuelo de las tortugas*“, que eso significa *Pappochelys*. No tenía aún un caparazón cerrado aunque disponía de unas costillas anchas, una de las características de las primeras tortugas, y una serie de huesos a lo largo de su vientre. Nos tenemos que desplazar temporalmente unos 20 millones de años más tarde para encontrar en los fósiles de *Odontochelys*, que vivió en Asia meridional durante el Triásico, a las

primeras verdaderas tortugas anápsidas. Ello supone que el de las tortugas sea uno de los grupos de reptiles más antiguos, mucho más antiguo que el de los lagartos y serpientes. *Odontochelys* era acuática y poseía un plastrón (parte ventral del caparazón) bien definido, aunque el espaldar era primitivo. La siguiente tortuga cuyos fósiles se conocen fue *Proganochelys*, que vivió en el Triásico superior en Eurasia hace unos 210 millones de años. Era una tortuga primitiva terrestre, con un caparazón parecido al de las especies actuales, pero poseía aún dientes en el paladar. La cabeza, cola y patas no podían retraerse dentro del caparazón, pero estaban protegidas por espinas.



Vista lateral del esqueleto del cuerpo de Pappochelys, el “abuelo de las tortugas” (Rainer Schoch, Nature⁽⁶⁴⁾, fair use)

Y hasta aquí la débil situación de los mamíferos y el predominio reptil durante el periodo Triásico. En próximos capítulos volveremos a hablar con mayor extensión de los dinosaurios ya que en su época fueron animales condicionantes de la vida en la Tierra. Entre las tres estrellas que desfilaron por la alfombra roja del Triásico fueron los más glamurosos. Un aerolito cortó en seco su ascendencia.

La segunda estrella fue la aparición de los mamíferos, aunque permanecieron por muchos años en un segundo plano ocultos por la imbatible competencia de los dinosaurios. También hablaremos de ellos en su momento. La tercera estrella de oro de este periodo fue la conquista del aire por los vertebrados, materializada como hemos comentado en los pterosaurios, los primeros vertebrados voladores en la historia de la tierra.

Mientras ¿qué había sucedido con las plantas?

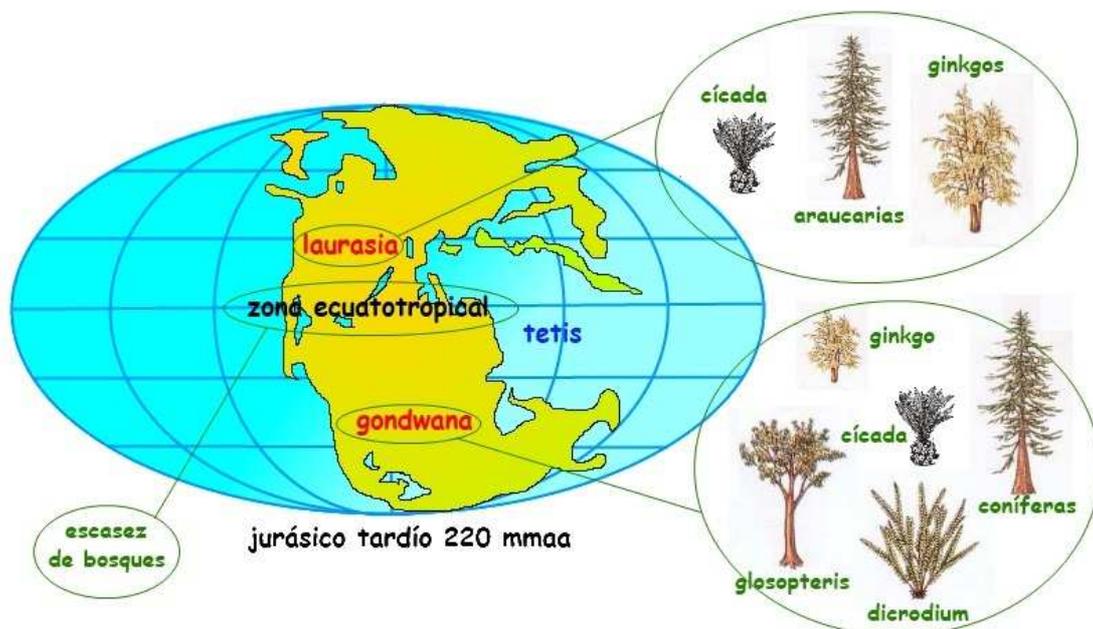
Realmente las condiciones extremas que habían afectado gravemente a la vida animal no tuvieron una incidencia semejante en la biomasa. Ya el clima del Pérmico había comenzado a ser seco y árido, por lo que, como ya hemos comentado en el capítulo 36, los bosques tropicales habían disminuido, y sin embargo las plantas resistentes a las sequías, plantas con

semillas como coníferas, helechos arbóreos o cicadáceas, habían prosperado en un entorno propicio para ellas.

De todas formas, al final del Pérmico habían desaparecido casi todos los *esfenofitos* -plantas tipo caña como las calamites- y los *licopodiofitos* arborescentes -los helechos de terrenos húmedos-, quedando únicamente representantes de pequeño tamaño. Aunque como también ya se ha comentado, la flora del Triásico, con algunas variantes, fue muy semejante a la de finales del Pérmico.

La forma del continente Pangea condicionó en gran medida la distribución de las plantas sobre su geografía. Si bien como regla general es cierto que en todo el territorio el clima fue seco y caluroso, con una estacionalidad muy acusada, el océano Tetis y la inmensidad continental en la franja ecuatorial supusieron una barrera para la expansión norte/sur de las especies vegetales, diferenciándose su distribución en las dos regiones resultantes: Laurasia al norte, más seca, y Gondwana al sur, más húmeda.

El norte de Pangea fue exuberante, en donde las coníferas araucarias fueron los árboles predominantes entre los de mayor tamaño. Agrupaciones de helechos arbóreos y ginkgos formaban el dosel vegetal de un sotobosque de helechos ubérrimos, cicadáceas y maleza.



Esquema de tendencia en la distribución de plantas sobre Pangea durante el Triásico (imágenes de plantas⁽⁶⁵⁾)

En la región ecuatorial las condiciones eran menos favorables para el desarrollo de las plantas, de forma que durante muchos años los bosques fueron muy escasos. Los pocos que había estaban formados por coníferas y cicadáceas. El final del Triásico fue más húmedo, lo que favoreció el crecimiento de las plantas y la recolonización animal de la zona por pequeños herbívoros del tipo de los cinodontos, que ya sabemos que llevaban la semilla de los futuros mamíferos, aunque la fauna predominante en el norte siempre fue la de los arcosaurios.

En el sur, sobre la antigua Gondwana, la predominancia de los helechos arborescentes fue clara, evolucionando con el tiempo desde el tipo *Glossopteris* al tipo *Dicrodium*. Este último fue ubicuo, pudiéndose encontrar desde parameras hasta en espesos bosques, o en tierras de secano. A veces era la única especie que se encontraba sobre el terreno. Le acompañaban en menor medida alguna conífera y flora propia de Laurasia, como ginkgos y cicadáceas.

En algunas partes de Gondwana los árboles mencionados fueron relegados a un segundo plano por gigantes helechos con semilla, los cuales crecían tanto que formaban el dosel superior de los bosques, con pequeños helechos y licopodios herbáceos en la umbría de su base. No obstante, en el hemisferio sur también coexistían las coníferas, especialmente a partir del Triásico medio. La exuberancia de la vegetación en el sur de Pangea favoreció la diseminación de los terápsidos herbívoros.



Representación artística de un paisaje triásico con una aplastante atmósfera (Sam Noble Oklahoma Museum of Natural History, autora: Karen Carr⁽⁶⁶⁾)

Quien sabe, quizás la imagen de arriba sea una copia exacta de algún recóndito paisaje de Pangea. Bien pudiera ser un rincón de Laurasia junto a un lago marino en el interior de la recortada costa de Cimmeria, hace unos 220 millones de años. Que vuele la imaginación. El ambiente se presiente pesado por la extrema temperatura, casi se respira el aire húmedo del caer de la tarde. Los tendidos rayos del sol poniente dibujan una pincelada de claridad sobre la familia de listrosauros que pastan en la orilla. Tras ellos, una concentración de calamitas. En lo más alto del cielo las colosales nubes monzónicas anuncian una fragorosa tormenta. El agua calmada durante estos momentos precursores de la debacle sólo se ve alterada por el nadar nervioso, posiblemente depredador, de un fitosaurio parecido a los modernos cocodrilos. Al fondo, altas coníferas conforman un agradable y potente bosque, a la derecha unas araucarias. Por delante, a la izquierda casi en primer plano un esbelto ginkgo. Sobre la orilla derecha un grupo de veloces *Celofisis*, unos pequeños dinosaurios oportunistas y carroñeros, buscando unos despojos a la espera de una presa despistada. Cubriendo el primerísimo plano de las bambalinas, unas matas de helechos y unos licopodios herbosos, alimento succulento para los cercanos herbívoros.

A la placentera escena le quedaban pocos días...

Extinción triásico-jurásico

El Triásico finalizó hace 200 millones de años con una nueva extinción masiva de la vida sobre el planeta, que afectó en mayor medida al medio marino. En el océano, un 22% de las familias y posiblemente la mitad de los géneros desaparecieron. De los reptiles marinos sólo sobrevivieron los ictiosaurios y los plesiosaurios.

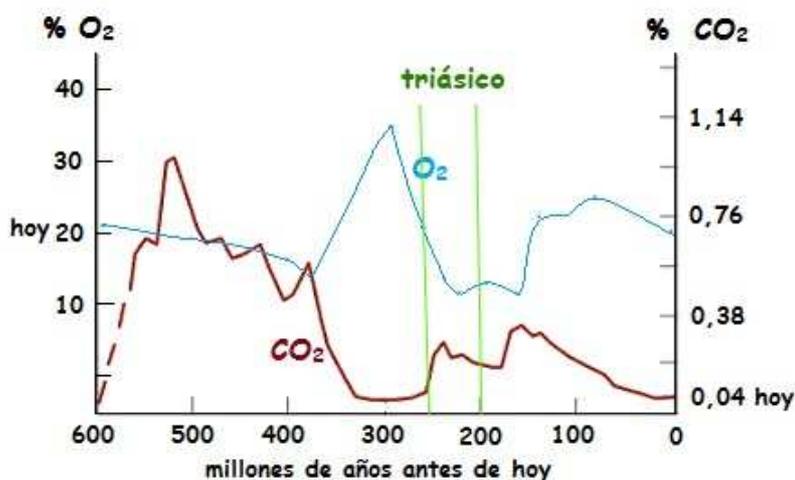
En tierra se extinguieron un gran número de grandes arcosaurios y los mayores anfibios. También afectó a los pequeños animales, en su mayoría reptiles, incluidos los terápsidos, de los que se salvaron los protomamíferos.

No todos los dinosaurios lograron sobrevivir, pero los que lo hicieron se expandieron rápidamente durante el posterior Jurásico y dominaron los habitats terrestres a lo largo del resto de la Era Mesozoica.

¿Cuáles fueron las causas de estas extinciones?

Todo indica que fue una consecuencia del exacerbado vulcanismo, aunque la explicación no está muy clara. Para el biotopo marino, los últimos

estudios apuntan a un incremento del CO₂ atmosférico que acidificó las aguas marinas. Veamos el porqué.



Es cierto que el registro fósil indica un incremento de ese gas. El origen es conocido ya que, en la frontera del Triásico con el Jurásico, Pangea había empezado a escindirse según un corte más o menos ecuatorial, continuación de la dorsal del océano de Tetis. Esto provocó un incremento del vulcanismo y una gran emisión de dióxido de carbono.

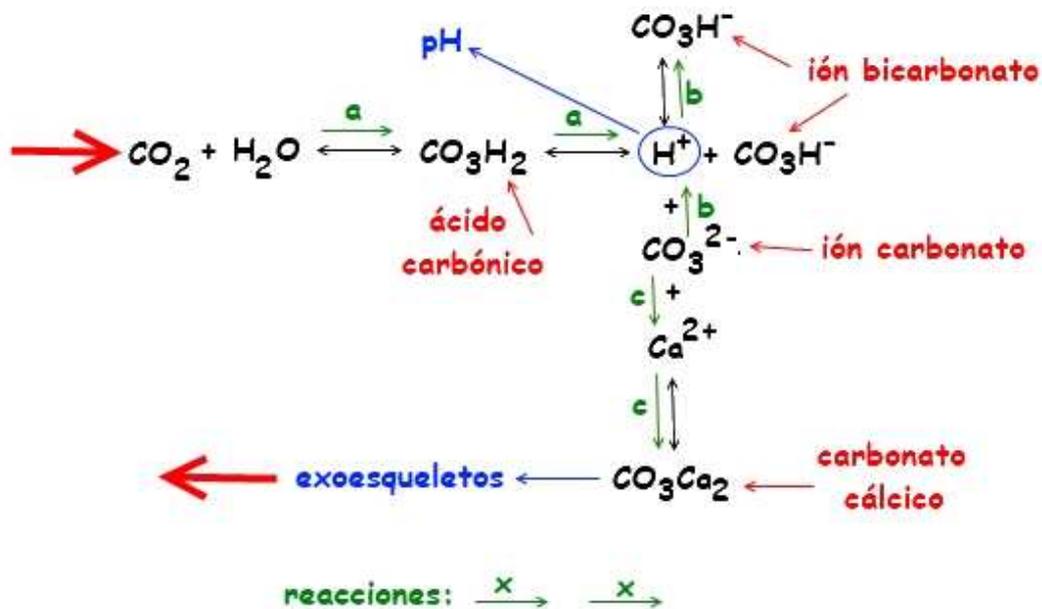
En 2013 el geólogo Terréense J. Blackburn y colegas suyos presentaron un estudio⁽⁶⁷⁾ basado en el análisis de la presencia de isótopos de uranio en rocas basálticas de la época, distribuidas a lo largo de diversas partes del planeta. La actividad volcánica de la época había expulsado volúmenes ingentes de lava a lo largo de cuatro cortos episodios -de tipo pulso- durante un periodo que duró 600.000 años y que generó lo que se denomina la “Provincia Magmática del Atlántico Central”. La cronología del episodio volcánico está soportada por datos paleomagnéticos acerca de una inversión del campo magnético terrestre, que coinciden con los datos de la precesión del eje terrestre, que manifiestan determinadas características de las rocas sedimentarias de la época. La conclusión de las dataciones basadas en el uranio acota el tiempo máximo entre la crisis volcánica y la crisis biológica de la extinción de finales del Triásico en 20.000 años. Lo cual parece asegurar una relación causa-efecto entre ambos episodios.

No obstante no todo parece tan evidente para otros, como podemos verlo en la publicación⁽⁶⁸⁾ de 2012 firmada por la geoquímica Bärbel Hönisch y colegas, en la que, tras analizar los sucesos geológicos durante el Fanerozoico, arguyen que no se puede encontrar una correlación absoluta

entre la acidificación del mar y el grado de saturación del carbonato cálcico, posiblemente dado que intervienen otros muchos factores.

Para entender mejor la base del proceso daremos una breve pincelada “físico-química” acerca de por qué el incremento del CO_2 , producido por el repunte de la actividad volcánica de finales del Triásico, afectó negativamente a la biota generadora de exoesqueletos de carbonato cálcico. Podemos seguir la argumentación en la figura de más abajo.

Una mayor concentración de CO_2 en la atmósfera supone una mayor presión de este gas sobre la superficie del agua, lo que favorece que una mayor cantidad de sus moléculas puedan disolverse. Condicionado por la temperatura de cada momento, claro. En los mares el dióxido de carbono reacciona con el agua pasando a formar ácido carbónico que se disocia en un ión hidrógeno y un ión bicarbonato. El primero de ellos a su vez puede capturar un ión carbonato, que ya se encontraba en el agua, transformándose en otro ión bicarbonato. Atención, por esta reacción el biotopo marino ha perdido en su stock un ión carbonato, ladrillo esencial de los exoesqueletos. Por tanto, la consecuencia de una mayor acidez es que va a haber menos iones carbonato libres en el agua.



Por otro lado en el mar se encuentra también calcio disuelto en forma de Ca^{2+} . Al igual que sucede con el ya mencionado ión carbonato, proviene en su mayor parte de las escorrentías continentales que transportan los productos de la meteorización de las tierras hasta el mar, o de la propia disolución del carbonato cálcico de los fondos marinos o del biológico de los propios exoesqueletos. El ión calcio tiene la tendencia a unirse con

nuestros iones carbonato y bicarbonato, pudiendo dar carbonato cálcico o bicarbonato cálcico.

El hecho es que los animales o plantas acuáticos generadores de conchas, cascarones o espículas en base al calcio, lo hacen usando la sal de carbonato y no la del bicarbonato. Posiblemente la evolución lo hizo así ya que la segunda es más soluble que la primera y por tanto tenía que ser menos eficaz en la carrera armamentística predador-predado.

Ahora sí podemos concluir: El dióxido de carbono formó ácido carbónico con el agua, incrementando su acidez, que a su vez afectó a la capacidad que tenían los organismos de crear exoesqueletos carbonatados, viéndose tremendamente afectados los corales y otros animales o algas con conchas y caparazones que habitaban los mares.

Tras esta digresión teórica despedámonos del Triásico. Como en otros periodos, éste también acaba en crisis, la cuarta gran crisis del Fanerozoico. La circunstancia no debe ser objeto de sorpresa, puesto que la frontera geológica entre eras y periodos casi siempre se apalanca en un episodio crucial para la vida de nuestro planeta Tierra. No deja de ser una decisión de geólogos. En este caso el Triásico acaba con un mar depauperado y una tierra, a pesar de los pesares, prometedora: ¡atacan los dinosaurios! ¡Y en el banquillo, los jóvenes pero bien preparados mamíferos!

El siguiente capítulo se presenta interesante.

39. Parque Jurásico

Dejamos las páginas anteriores una vez más con el corazón encogido. No era la primera vez en esta historia que nos había tocado presenciar un retroceso brutal de la biodiversidad. Nos encontrábamos a finales del periodo Triásico, durante el que habían señoreado los reptiles. Muy al principio los mamiferoides lograron ser la locomotora de la repoblación tras la catástrofe de la extinción del Pérmico. A ellos les siguieron los muy preparados saurópsidos en su versión “*familia cocodrilo*”. Muy al final del periodo cederían el testigo a sus primos los dinosaurios, por entonces aún en versión reducida. Tras la crisis con la que terminó el Triásico estos saldrían reforzados; mientras los mamíferos, activos, laboriosos y vigilantes, esperaban sus oportunidades. Hoy vamos a empezar a ver este renacer adentrándonos en el Jurásico, periodo que bascula entre 200 y 145 millones de años antes de hoy.



El nombre de Jurásico proviene de las primeras rocas estudiadas de este periodo, que se encuentran en los montes del Jura, prolongación de los Alpes entre Suiza y Francia. Es también en este periodo cuando Pangea se empieza a desmembrar, con el resultado de la separación de las tierras del hemisferio norte y las del sur.

Ésta es la época de los dinosaurios, del griego δεινός σαῦρος -deinós sauros-, los “*lagartos terribles*”, que dominan la Tierra. Las aves verdaderas comenzarán a surcar los cielos. Mientras, esperaban aún en un segundo plano los mamíferos.

Pangea empieza a moverse y a rotar todas sus piezas, cada una de ellas empujada por distintas fuerzas, motorizadas por la inusitada actividad de

las dorsales marinas, que poco a poco iban adentrándose en los continentes. Los rifts que se formaron se transformaban en fallas hundidas que se iban anegando de agua, aumentando progresivamente la superficie líquida del planeta gracias al creciente número de mares de aguas someras que iban apareciendo.



El más importante fue el rift ecuatorial de Pangea, que progresivamente se fue abriendo para originar lo que sería el Atlántico Norte con dos ramificaciones, una que generaría el golfo de Méjico y otra que iniciaría la separación de África y Sudamérica. En el sur, otro rift secundario se generó entre la actual África y lo que con el tiempo llegó a ser el subcontinente de India. Junto a estas tremendas grietas magmáticas se generaron un sinnúmero de volcanes que dejaron grandes cantidades de lavas basálticas.

Posiblemente la importante actividad volcánica con emisión de grandes volúmenes de magma fue la que motivó el que el nivel del mar durante el Jurásico se elevara, lo que se tradujo en la inundación de grandes extensiones de tierra, como podemos comprobar que sucedió en el centro de Norteamérica y en casi toda la futura Europa, que en aquel momento era más un conglomerado de islas que un auténtico continente. Esta circunstancia fue la que propició la formación de ricos depósitos sedimentarios de calizas. Junto a las costas se crearon también abundantes depósitos sedimentarios de rocas fragmentadas, cementadas con materiales

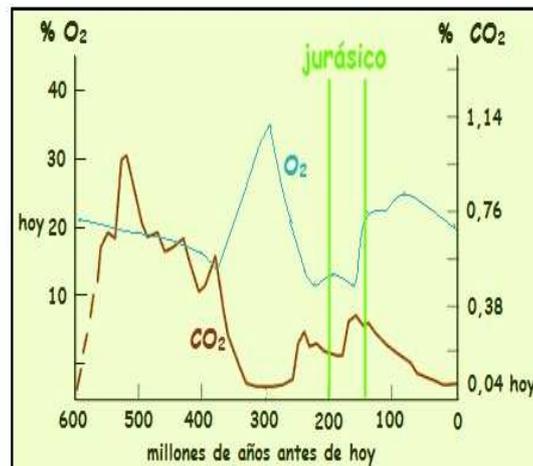
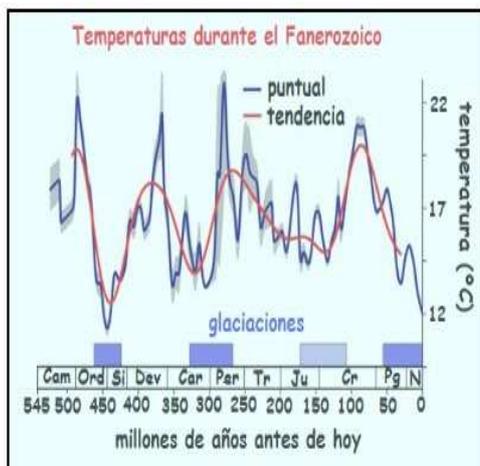
finos que al consolidarse quedaban aprisionados en su interior formando así una especie de guirlache.



Región de volcanes y de extrusión de coladas basálticas que llegaba desde Brasil hasta España a inicios del Jurásico

Mientras en la costa norte del océano de Tetis se consolidaba la orogenia Cimmeriana de la que ya hablamos en el capítulo anterior, el movimiento de Laurasia hacia el oeste sobre el océano Pacífico inició el arco orogénico norteamericano de las Montañas Rocosas y de Sierra Nevada.

El incremento de la erosión y sedimentación en las cada vez más extensas líneas de costa, hizo que los cadáveres de los animales marinos que antes se descomponían en el fondo del mar consumiendo oxígeno, ahora no lo hicieran al estar enterrados por capas y capas de calizas. La consecuencia fue el incremento del oxígeno en la atmósfera, en donde también iba creciendo la concentración del CO₂ emitido por la intensa actividad volcánica en los rifts y dorsales marinas.



El anterior panorama esconde los datos claves condicionantes del clima durante el Jurásico, lo que impuso un cambio de tendencia que culminaría en el posterior Cretácico. Comentaremos con mayor detalle el proceso en el siguiente capítulo.

Se había salido del Triásico con un clima que empezaba a cambiar debido al inicio de la ruptura de Pangea. Las temperaturas globales presentaban unas tendencias a la disminución, aunque manteniéndose los máximos en unos 5° o 6° superiores a las medias actuales, apoyado por el efecto invernadero de un cada vez más abundante CO₂. Al irse abriendo Pangea la humedad en el interior del continente se había incrementado, e incluso se debían producir nevadas estacionales en las regiones polares. Durante todo el Jurásico la tendencia siguió el mismo rumbo: más humedad y estacionalidad menos extrema, manteniendo un nivel medio alto de temperaturas.

La biota vegetal.

Habíamos dejado a la Pangea del Triásico con un clima y un territorio árido que poco a poco fue cambiando a medida que se introducía el Jurásico, cálido y húmedo. La influencia fue grande en especial en las latitudes elevadas, ya que allí comenzaron a prosperar bosques de jungla con una rica vegetación. La compartimentación de los continentes hizo que la flora fuera diversa y geográficamente muy particular.



La actual cícada Cycas rumphii (izquierda) y fósil de la especie Zamites feneonis (derecha) (Wikimedia, GNU FDL 1.2 y CC BY-SA 3.0 Unported)

Las gimnospermas fueron las plantas mejor representadas. Entre ellas dominaban nuestras conocidas del Triásico las cicadáceas, árboles semejantes a las palmeras con troncos rechonchos y una fronda de hojas que recuerdan también a la de las palmeras.

De todas formas, las coníferas siguieron siendo los árboles más grandes conjuntamente con los helechos arbóreos, que podían alcanzar los 20 metros de altitud. En latitudes medias y altas del hemisferio norte siguieron proliferando los ginkgos mientras que las podocarpáceas, una especie de araucaria, abundaban en el hemisferio sur. Bajo estos árboles prosperaban los pequeños helechos.

En los cinturones de clima tropical y cálido, que eran las regiones donde habitaban preferentemente los dinosaurios, continuaba el paisaje del Triásico con escasez de bosques y una abundancia en vegetación abierta de matorrales y pantanos.

De nuevo dejamos volar la imaginación, y antes de rellenar el escenario con la fauna, nos trasladamos al pasado gracias a la siguiente representación artística de un paisaje del Jurásico. Al fondo, unos cerrados bosques de coníferas. El primer plano está dominado por cicadáceas y helechos. También un tronco caído sobre el pantano que posiblemente se transformará en carbón al ser engullido por el limo.



Paisaje del Jurásico (autor: John Sibbick)

La biota animal

Así como el clima y la vegetación del Jurásico fueron una continuación del anterior periodo Triásico, lo mismo sucedió con la fauna. La naturaleza fue pródiga con los dinosaurios. Y por lo que nos importa a nosotros, cuidadosa con los escurridizos mamíferos. Con el resto de especies continuó trabajando en una tranquila vía evolutiva. De todas formas, las crónicas del momento bien pudieran hablar de los siguientes temas.

Entre los **insectos** le seguiremos la pista a los *himenópteros*, ya que a principios del Jurásico tuvieron lugar dos hechos evolutivos fundamentales: la aparición de la cintura de avispa y el desarrollo del parasitismo. La estrategia del parásito consistía en poner los huevos dentro del animal parasitado, de forma que las larvas podían alimentarse de sus tejidos mientras disfrutaban de un “hogar” donde desarrollarse.

Otra de las grandes innovaciones de los himenópteros apareció a finales de este periodo, y fue el desarrollo del aguijón que inicialmente se usaba para matar o paralizar presas, tal y como hacen algunas especies en la actualidad, y que posteriormente se desarrolló como arma defensiva.

También en este periodo encontramos lo que parecen ser los primeros insectos polinizadores⁽⁶⁹⁾ -en este caso, de las plantas gimnospermas del momento- representados por las viejas “*moscas escorpión*“, los *mecópteros*, que ya a finales del Jurásico habían desarrollado una probóscide.



Fósil de la “mosca escorpión” Lichnomesopsyche gloriae en el que se aprecia claramente la probóscide (imagen: Wenying Wu⁽⁶⁹⁾, fair use)

En el mar continuaba floreciendo la fauna que conocemos del Triásico con una gran variedad de invertebrados. Dijimos más arriba que en estos momentos Pangea se estaba dividiendo, dejando entre las partes resultantes mares no muy profundos en donde las condiciones para la Vida eran espléndidas. Se cree que esto pudo ser el motor evolutivo que empujó hacia la aparición de nuevas especies marinas, modificación de las más antiguas, con unas incrementadas capacidades de predación y supervivencia. En estos mismos momentos una revolución semejante alteraba también la vida de los invertebrados marinos, lo que se conoce como la “Revolución Marina del Mesozoico” de la que hablaremos en el próximo capítulo 43, “*La biota animal en el Cretácico*”.

Así pues, entre los **peces** aparecen por primera vez un tipo de teleósteo y grupos de modernos tiburones. Los primeros habían osificado su esqueleto, lo que les permitía insertar unos músculos más potentes. No sólo eso, se habían despojado de las pesadas escamas protectoras de sus antepasados y su aleta caudal se había hecho simétrica, lo que le proporcionaba una mayor eficiencia y maniobrabilidad. En resumen, los nuevos teleósteos eran peces mucho más ágiles, veloces y con gran dinamismo. Ventajas evidentes tanto a la hora de predar como de no ser predados. El más primitivo de ellos -apareció durante el Triásico tardío- fue *Pholidophorus*. Esta potente evolución de los teleósteos impactó tremendamente en la de los tiburones. Cosas de las carreras armamentísticas. De forma que pasaron de los fenotipos propios de los *Hybodontiphorma* a los de los modernos tiburones, los *Neoselacimorpha*, lo que permitía a estos últimos una natación más potente de forma que, a finales del Cretácico, los primeros habían desaparecido bajo la presión de los segundos.



Imagen artística de una serpiente que viviría en la frontera entre el Jurásico y el Cretácico Inferior (Imagen: Julius Csotonyi)

En las aguas del Cretácico también continuaron los **reptiles** marinos del periodo anterior, como los ictiosaurios y familia, así como los voladores pterosaurios. De esta época son también las primeras evidencias de las serpientes ya que se conocen⁽⁷⁰⁾ al menos cuatro nuevas especies, procedentes de Inglaterra, Portugal y Estados Unidos, cuyos fósiles datan de hace entre 167 a 143 millones de años. No se sabe muy bien si eran terrestres o marinas.

Los cocodrilomorfos, de los que comentábamos que dominaron los finales del Triásico, siguieron siendo abundantes y diversos tanto en agua como en tierra.

Y no nos vamos a despedir en esta pequeña reseña del mundo animal sin hablar de los **anfibios**, ya que es en este periodo cuando aparecen las nuevas formas que nos van a acompañar hasta el día de hoy: ranas, sapos, tritones y salamandras. A su lado seguían decayendo los ancestrales temnospóndilos, viejos conocidos desde el Pérmico o incluso antes.

Mamíferos y dinosaurios

A pesar del continuismo en la biosfera que parece insinuar una gris monotonía, en este periodo Jurásico hay que resaltar y poner foco en dos argumentos fundamentales. El primero corresponde al desarrollo y dominio de los dinosaurios a lo largo de los 135 millones de años que aún quedan del Mesozoico, y el segundo, relativo a la escondida vida de los mamíferos, expertos supervivientes en el mundo hostil de los dinosaurios, y que sólo explotarían cuando aquellos desaparecieron a finales del Cretácico.

Ambos, mamíferos y dinosaurios, como parientes del árbol genealógico de los reptiles, representan dos alternativas metabólicas, dos apuestas distintas para afrontar la vida, dos caminos impulsados por las circunstancias del medioambiente y acotados según criterios de selección natural.

Todo va de movimiento y resistencia. La Vida exige, lógicamente, actividad, agilidad y velocidad, características dinámicas fundamentales para sobrevivir, alimentarse, depredar, huir o aparearse. Y eso se puede llevar a cabo aplicando diversas estrategias. La de los reptiles, por ejemplo, implica un metabolismo basal bajo, pero con el suficiente punto de potencia instantánea como para salir de la necesidad en una milésima de segundo: veo una mosca y arranco a correr, percibo una amenaza y llego al abrigo en un suspiro... pero hecho lo hecho, me he agotado y ya no puedo más. Un reptil tras una carrera tiene que parar a descansar y reponer su

respiración, su temperatura corporal se le ha agotado rápidamente. Tienen un metabolismo basal bajo y un sistema de sangre “fría” que no les permite una regulación fina y continua en la generación/consumo de energía en el esfuerzo. De hecho, los reptiles se enfrían mucho por la noche, pierden capacidad de actuación en estos momentos en donde cuentan exclusivamente con su metabolismo basal, que por definición es muy bajo y sin posibilidad de recargarlo hasta que la luz solar caliente el día, y eso es lo que hacen antes de iniciar su jornada o tras un esfuerzo puntual: se suben a una piedra cara al sol. Tienen potencia, pero no resistencia a corto plazo. Y eso es importante si eres pequeño, más pequeño que tus depredadores. Quizás por ello la selección natural fue pastoreando a algunos reptiles, los dinosaurios, hacia cuerpos cada vez mayores, con los que la única preocupación era conseguir comida o conseguir pareja. Y para esto, siendo gigante, con poder pegar una carrerita o comer vegetales estaba todo resuelto. Por lo tanto, la primera alternativa metabólica: acelerador puntero pero de corto recorrido, relativamente pocas necesidades alimentarias, proceso que tampoco necesitaba que fuera extremadamente eficiente, vida diurna y modorra nocturna o invernal.

No obstante, no podemos dejar de decir que, como veremos en el capítulo que sigue, parece ser que algunos dinosaurios, en especial los más pequeños, sí pudieron tener algún metabolismo con capacidad de regulación de la temperatura corporal.

Bien, pues la segunda alternativa metabólica sólo podía ser la que permitiera hacer una vida complementaria a la de los que habían optado por la primera vía: actividad y resistencia. No sólo moverse para cubrir la necesidad de cada día, sino también, en un mundo amenazante, lleno de depredadores gigantescos, aprovechar cada oportunidad, cada momento. Había que estar en perfecto estado de revista cada segundo, atento y dispuesto a comer sin que te coman, a correr, a aparearse, a cuidar de la prole. Y esto sólo lo consiguieron aquellos animales que permanecían vitales e infatigables las veinticuatro horas del día. Aquellos cuyo metabolismo basal era lo suficiente activo como para estar con el gatillo preparado para disparar en un instante, en cada instante. No sólo tener un punto de máxima potencia sino tenerlo siempre, infatigablemente. Un metabolismo punta explosivo y un metabolismo basal a muchas revoluciones, exprimiendo al máximo las oportunidades energéticas del oxígeno. Hay muchos que opinan que no es casual la resistencia de estos pequeños animales en un mundo hostil, ligándola con la oportunidad que les iba brindando el incremento del oxígeno que se inició en esta época, y del que comentábamos unos párrafos más arriba. Así se podía sobrevivir

siendo un pequeño animal en el Triásico o en el Cretácico, al abrigo de los dinosaurios. Y esto conllevaba un nivel energético alto, continuo, una sangre caliente con temperatura mantenida y controlada, un metabolismo trepidante, unas necesidades alimenticias importantes, una eficiencia en la transformación de materia en vida. Quemar energía sólo para obtener calor: la realidad es que el metabolismo de sangre caliente es diez veces más rápido por unidad de masa.

Había que esconderse de los depredadores, había que aprovechar los momentos en que los competidores gigantescos estuvieran aletargados por el frío de la noche, tenían que salir a buscarse la vida tras un periodo de entrenamiento en una infancia protegida y preparadora, llena de experiencias aprendidas de los mayores. Vida nocturna, oportunidades durante el frío, largo y oscuro invierno... sólo se podían gestionar con sangre caliente, con un metabolismo basal consistente. Así sobrevivieron los mamíferos. Quizás reminiscencia de aquella época y costumbres sean los hábitos nocturnos de los mamíferos murciélagos en competición por las oportunidades del aire y vuelo con las aves, hijas de los dinosaurios, diurnas.

La noche era su aliada, el clima frío era su aliado. El tamaño era su cortina de humo. Triunfaban aquellos que mutaban para aprovechar al máximo estos entornos para los que los dinosaurios no estaban preparados, ni falta que les hacía. Su debilidad fue la cuña por donde entraron los mamíferos.

Sangre caliente y unos sentidos preparados para la nocturnidad. Una capa pilosa que ayudaba a mantener la temperatura del metabolismo basal, unas glándulas sudoríparas que regulaban esta temperatura, vida nocturna en la que era fundamental un sensible sentido del olfato para identificar amenazas y oportunidades, una visión adaptada a las sombras de la noche sin demasiada necesidad de nitidez ni colores, apta para bajos índices de luminosidad. Un tamaño diminuto con el que no tener grandes problemas para el cobijo. Un metabolismo activo para correr sin fatigarse. Una estructura de conductos respiratorios con los que respirar, jadear y correr, e incluso comer a la vez; para ello el diafragma, que no tenían los reptiles, ayudaba. Un aparato masticador y digestivo eficaz para optimizar la poca comida de forma que pudiera alimentar este metabolismo tan activo que les permitía sobrevivir sin competir. Numerosos artrópodos a su disposición, insignificantes para la mayoría de la fauna de gran tamaño.

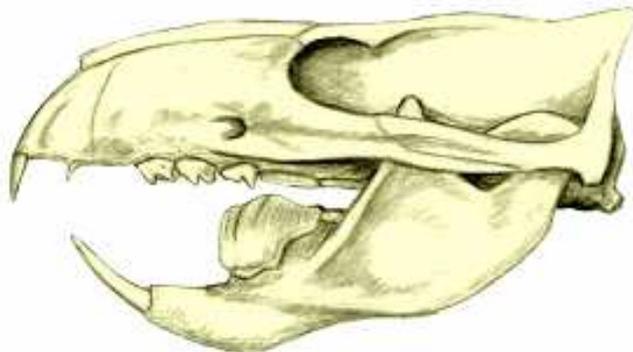
Así se transformaron los cinodontos mientras los dinosaurios medraban. Pequeños animales, ágiles, vivos y oportunistas. De todas formas, aún no

se había alcanzado el salto evolutivo completo pues aunque les llamamos mamíferoides, con “*forma de mamífero*“, no dejaban de ser todavía unos reptiles.



Representación artística de un Hadrocodium wui (Imagen: Mark A. Klinger, Carnegie Museum of Natural History, Science/AAAS⁽⁷¹⁾)

No hay un gran registro fósil de estos pequeños animales con aspecto de mamífero. Un espécimen que podemos considerar próximo a los mamíferos basales del Mesozoico es el *Hadrocodium wui* que vivió en el Jurásico temprano, hace unos 195 millones de años. Era extremadamente pequeño, con una longitud de 3,2 centímetros y unos dos gramos de peso.



Cráneo del murtitiberculado Ptilodus en donde se aprecia la potencia de sus piezas dentales (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Un poco más tarde aparecen los *multituberculados*, clasificados ya como mamíferos, de los cuales se conocen más de 200 especies fósiles datadas entre el Jurásico medio y el comienzo de la era siguiente, el Cenozoico. El nombre del grupo proviene de la estructura de los molares, con muchas cúspides (tubérculos), pero la dentadura se caracteriza además por un par de incisivos en la mandíbula inferior y ausencia de caninos. Tenían una constitución corporal semejante a las actuales ardillas.

Parientes próximos a los multituberculados fueron los *triconodontos*. Habitaron en casi toda la superficie terrestre del planeta a lo largo de un largo periodo, el comprendido entre el Triásico tardío y el Cretácico tardío. Su nombre proviene de que sus dientes presentaban tres cúspides, indicio de que eran usados para moler el alimento. Eran muy pequeños, entre un gato y un ratón, y se alimentaban de insectos.



Representación artística del triconodonto Gobiconodon (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

También parientes de los multituberculados son los *haramíidos*. Contemporáneos de los triconodontos, alargaron su existencia un poco más, hasta principios de la era Cenozoica. Haremos mención a dos de sus especímenes de los que se han encontrado en China algunos de sus fósiles datados del Jurásico, entre 160 y 165 millones de años. Se trata del arborícola *Arboroharamiya* y del más primitivo *Megaconus*. El estudio de estos fósiles ha dado lugar a cierta indefinición sobre el origen de los mamíferos, aunque todo parece indicar que el origen de los verdaderos mamíferos podría situarse a finales del período Triásico, hace más de 200 millones de años.

Las nuevas habilidades que iban consiguiendo los primitivos mamíferos eran fruto de modificaciones corporales. Andaban de forma más erguida, ya que las patas se situaron más verticalmente por debajo del cuerpo consiguiendo así un considerable ahorro energético durante el desplazamiento. Con esta disposición los mamíferos soportaban directamente el peso del cuerpo con las patas, lo que en grandes animales ofrecía una ventaja mecánica considerable. Además, con las patas en posición ventral se podía abandonar el movimiento ondulatorio de la marcha reptil, lo que dificultaba el llenado de los pulmones con aire.

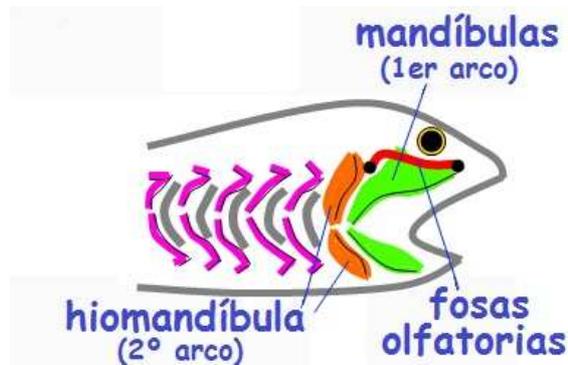
Los dientes, que inicialmente se usaban para sujetar y desgarrar la presa para luego tragarla entera, cambiaron para dar paso a dientes especializados, entre ellos los molares, con los que mejoraban la masticación de la comida, lo que facilitaba una rápida digestión. También desarrollaron un paladar secundario en el techo de la cavidad bucal, innovación que les permitía masticar y respirar al mismo tiempo.

En cuanto a su capacidad mordedora, la efectividad de su nueva mandíbula inferior “monopalanca” –de un solo hueso-, con la que la presión se efectuaba en los dientes y no en su articulación, se vio reforzada por una fosa temporal, por la que se les conoce como sinápsidos. Tal fosa se fue haciendo cada vez más amplia y situándose más cerca de la órbita ocular, con la que llegó casi a unirse, en donde se acomodaban los grandes músculos que movían la mandíbula inferior. Con ello se liberó al cráneo de colaborar en esta función, que a fin de cuentas le constreñía el tamaño, con lo que se le permitió el desarrollo craneal en volumen.

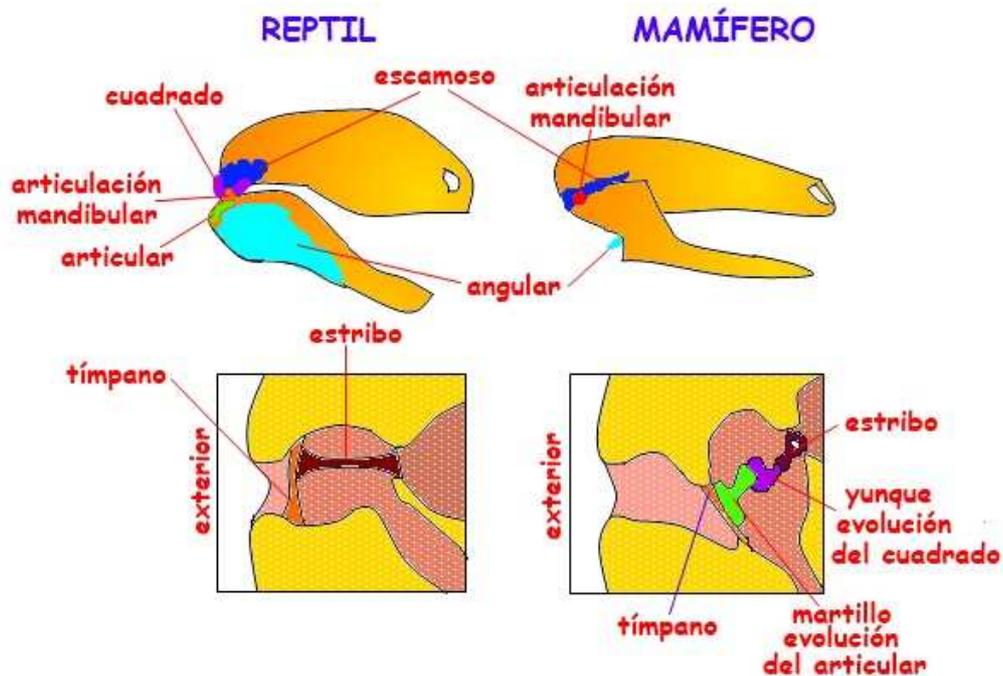
El efecto monopalanca de la mandíbula se había conseguido al disminuir su número de huesos comparándolo con la de los reptiles, llegando a estar formada por uno sólo. Recordemos del capítulo 29 anterior, dedicado al periodo Silúrico, como provenían de los huesos del primer arco branquial de los peces. Algunos de estos huesos migraron hacia la parte posterior para desempeñar una función completamente distinta, como parte del oído medio.

El *estribo* es uno de los huesos del oído medio de reptiles y mamíferos, y se corresponde con el hiomandibular de los peces, una pieza que les sirve de soporte de la mandíbula con el cráneo. En los primeros vertebrados terrestres podría haber tenido una triple función. Se trataba de un hueso denso y robusto, de modo que podría realizar una función de unión craneomandibular, a la par de colaborar con el sentido del oído y en la respiración. Cuando en el camino evolutivo de los mamíferos el cráneo

perdió su elasticidad y la caja craneana se soldó, el estribo ya no fue necesario como elemento de soporte y utilizó su potencial evolutivo en dedicarse exclusivamente a la función auditiva.



Por delante del hiomandibular en los reptiles, anfibios y aves, y resultado de la evolución de la parte superior del ancestral primer arco branquial de los peces, se encontraban los huesos cuadrado y articular, que efectivamente constituían la bisagra que articulaba ambas mandíbulas. Con el paso del tiempo esta articulación se fue desplazando hacia delante, hacia el hueso dentario o mandíbula inferior, transformándose el hueso cuadrado en el *yunque* del oído medio de los mamíferos, y el articular en el *martillo*. La hendidura entre los dos primeros arcos pasó a formar la trompa de Eustaquio.



Evolución de los huesos mandibulares y del oído de los reptiles a los mamíferos

La audición mejorada permitía a los cinodontos relacionarse mejor con su ambiente, lo que se habría desarrollado a la par que la mejora en la capacidad cerebral para procesar el cúmulo de información auditiva al que tenían acceso.

Además de un sistema auditivo desarrollado, los mamíferos disponían de un olfato privilegiado que también les servía para manejarse en su entorno nocturno habitual, así como para reconocerse gracias al desarrollo de nuevas glándulas odoríferas. La cobertura de pelos ayudaba a este propósito. Este sentido debió ser muy importante para los mamíferos, e incluso hay estudios⁽⁷²⁾ que proponen que fue el olfato el que espoleó la evolución de cerebros complejos en estos animales.

Estos estudios también especulan sobre la influencia del pelo corporal en el desarrollo del tamaño del cerebro. Por el análisis de los fósiles de *Castorocauda lutrasimilis*, un pequeño animal mamaliaforme de costumbres semiacuáticas, sabemos ya de la existencia de estas excrescencias de queratina hace unos 164 millones de años. Los pelos sirvieron inicialmente, además de para regular la temperatura corporal, como pequeños sensores que orientaban el movimiento, permitiendo a estos animales circular con seguridad a través del accidentado terreno y evitar daños en la oscuridad. El control de la gran cantidad de información generada bien pudo estimular el desarrollo de sus redes neuronales.

Un mejor olfato, un mejor oído, un mejor tacto, una mejor coordinación motora, en fin, una mejora en la habilidad de producir movimientos musculares diestros usando los sentidos, además de la atención en el cuidado de sus crías, desembocó finalmente en la formación de campos sensoriales intrincados en el neocórtex de los mamíferos, es decir, promovieron el desarrollo de su cerebro y de sus capacidades.

Las glándulas de la piel no sólo servirían para su función original, dar señales odoríferas, sino que evolucionaron más tarde para poder regular también el calor vía la sudoración e incluso, tras una especialización, a segregar líquido alimenticio para las crías, transformándose en las glándulas mamarias específicas de esta clase de animales.

Llega el momento de tener que dejar a los mamíferos del Jurásico, ya una realidad en el árbol genealógico del reino Animalia. El capítulo que sigue continúa en los dominios de este periodo geológico y lo vamos a dedicar a los grandes protagonistas del momento, los dinosaurios.

40. Grandes dinosaurios

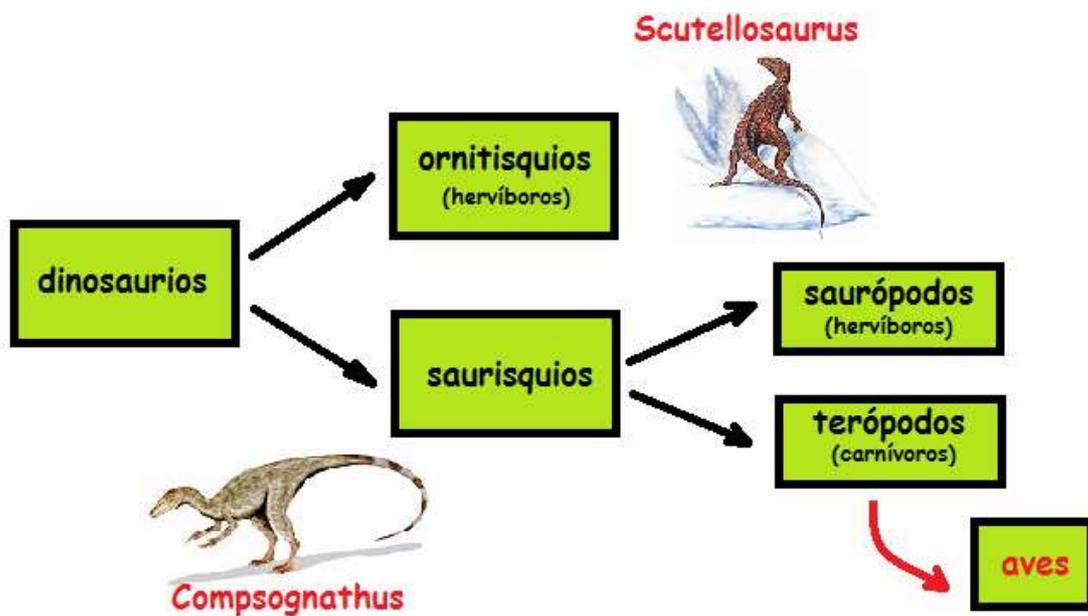
En el capítulo anterior conocimos los principales acontecimientos que le sucedieron a nuestro planeta en un momento en que se iniciaban profundos cambios geológicos, que a la postre le llevaron a la configuración actual de continentes. Vimos cómo se alteraban las condiciones atmosféricas y climáticas, entorno en el que se movía pausadamente su biosfera. Nos centramos en dos de sus más destacados actores, dinosaurios y mamíferos, intentando comprender qué les hacía diferentes entre sí y por qué. En este capítulo continuamos la historia centrando el argumento en los carismáticos dinosaurios, con lo que completaremos prácticamente el Jurásico, periodo que bascula entre 200 y 145 millones de años antes de hoy. En un capítulo posterior desarrollaremos todo lo concerniente a su conquista del medio aéreo, que se produjo entre este periodo y el siguiente.



Mientras los mamíferos raramente excedían el tamaño de un gato, aunque a decir verdad su tamaño se asemejaba más al de un roedor depredador de pequeñas presas, los dinosaurios experimentaron casi todas las alternativas vitales posibles: todos fueron animales terrestres a excepción de los ancestros de las aves; sus tamaños variaban desde pequeños a gigantes; fueron herbívoros o carnívoros; algunos practicaron originariamente el bipedismo, aunque otros anduvieron siempre a cuatro patas; la mayoría tuvieron sangre fría pero alguno, en especial los conectados con las aves, parece que eran de sangre caliente; unos eran rápidos y otros de pasos lentos y seguros. Ahora bien, no todos los grandes animales de la época fueron dinosaurios. Ni los cocodrilos, ni los pterosaurios voladores, ni los grandes reptiles acuáticos lo eran: sólo los que llevaban en su pasaporte la denominación de “arcosaurios ornithodiras dinosauriformes”. *Sólo aquellos arcosaurios que desarrollaron una serie de cambios anatómicos relacionados entre sí y que en su mayoría revolucionaron su capacidad de*

marcha, generalmente siguiendo el esquema general de bipedismo heredado del reptil que fue su ancestro.

Basándonos en la anterior característica los clasificamos en dos grandes órdenes, como se muestra en la figura siguiente: los ornitíscuos y los saurisquios, que se diferenciaban casi exclusivamente en la disposición de su cadera, cuyos huesos son parte fundamental en la cadena de soporte y transmisión del movimiento. Los primeros de esta clasificación se presentan con “*cadera de ave*”, y los segundos, con “*cadera de lagarto*”. De estos últimos evolucionaron las aves, a pesar de lo que su nomenclatura parece insinuar.

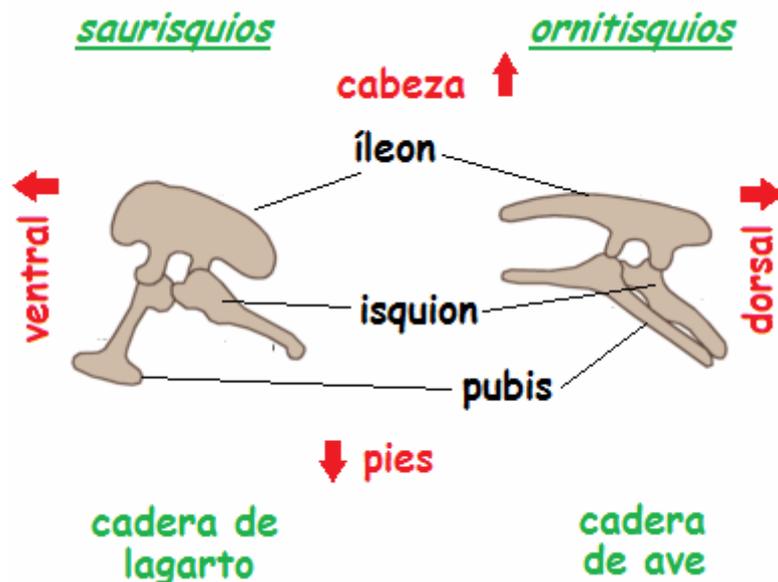


Clasificación de los dinosaurios

Una de las principales características de los dinosaurios, con alguna excepción, es la propiedad de caminar en posición erguida. Esa habilidad provenía ya del reptil en la base del clado -rama del árbol filogenético con un antepasado común-, pero en ellos se mejoró la eficiencia de este tipo de marcha, lo que se consiguió al mudar el entronque de las patas con el cuerpo, que se situaron en posición perpendicular *por debajo* del cuerpo, como los mamíferos, y no hacia los costados como en la mayor parte de los reptiles. Y esto se consiguió modificando la cadera. En todos los tetrápodos esta está generalmente compuesta por una serie de huesos que forman una especie de copa en la que queda protegido el intestino delgado, pero su función principal es que sirve de soporte estructural para el animal, ya que a través de ella se transmite el peso del cuerpo al fémur, primer hueso de las extremidades inferiores. En esta estructura está además la

articulación en la que bascula el movimiento de la pata y la atadura muscular motora de este hueso.

En los dinosaurios el hueso anteroinferior de la cadera, el pubis, evolucionó hacia dos morfologías distintas: con proyección hacia adelante, como en los mamíferos, o hacia atrás, como en las aves. Cada una de estas disposiciones clasifica a las dos grandes “familias” (propriadamente órdenes) de dinosaurios. Además, el fémur, que presenta una disposición vertical con respecto al cuerpo, evolucionó su engarce con la cadera hacia una articulación horizontal en ángulo recto.

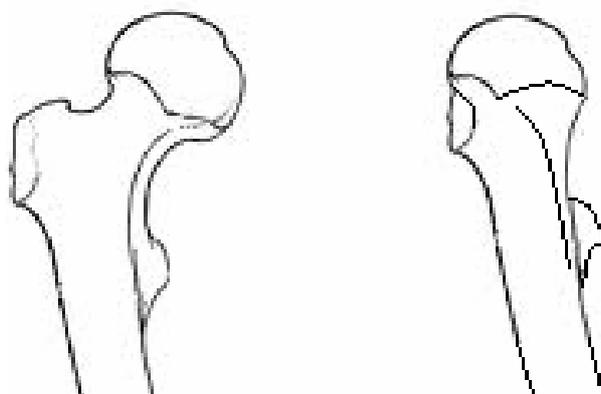


Tipos de cadera de los dinosaurios (a partir de Wikimedia, GNU FDL 1.2)

El camino hasta aquí había sido largo. Los primeros arcosaurios tenían las patas abiertas a los lados del cuerpo, como los lagartos actuales, adoptando una postura agachada. Caminaban siempre con las rodillas y tobillos en ángulo recto lateral, por lo que al moverse no les quedaba otro remedio que oscilar el cuerpo de un lado para otro, reminiscencias de su antigua vida de peces. A mediados del Triásico ya habían adoptado una postura semiagachada, con la articulación del fémur un poco más ventral, aunque no muy diferente a la anterior. Ello les permitió elevar el cuerpo, haciendo la marcha más cómoda y rápida, entre otros motivos por disminuir el rozamiento del vientre con el suelo. A finales del Triásico tanto la rama de los cocodrilos como la de los dinosaurios habían adoptado ya una marcha erguida, con las extremidades siempre debajo del cuerpo. Los primeros, los cocodrilos, con una disposición tal del fémur y su articulación con la cadera que hacía que sus patas adoptaran una postura totalmente vertical

bajo el cuerpo. En cambio, los dinosaurios habían evolucionado hacia un fémur y articulación en ángulo recto, como ya se ha comentado, similar a la de los mamíferos.

Esta posición es energéticamente más eficaz, ya que no tienen que gastar ningún esfuerzo en mantener el cuerpo separado del suelo sin arrastrarlo. Por contra, la postura era menos estable, lo que la selección natural contrarrestó con una cadera potente en donde se afianzaban unos músculos fuertes que sujetaban y equilibraban las extremidades. El mecanismo de retroalimentación del equilibrio posiblemente fue otro estímulo para el crecimiento cerebral.



Tipos de estructura del fémur. La cadera de los dinosaurios evolucionó hacia la de 90° (izquierda) a partir de la recta de los reptiles (derecha).

A las anteriores modificaciones se les unieron otras complementarias: La articulación de la rodilla pasó de una posición lateral a una inferior, recta, debajo de la articulación de la cadera, por lo que pasó a tener un movimiento anteroposterior; La rotación de los tobillos adoptó también un movimiento semejante. Con ello los miembros se movían paralelos a la columna vertebral y en una posición casi vertical, ayudando también a la agilidad de la marcha.

Las modificaciones corporales que acabamos de comentar unifican a los miembros de los dinosaurios. No obstante, sobre ellos se abren una serie de discusiones relacionadas con su metabolismo y costumbres.

La más paradigmática quizás es la que especula acerca de su posible condición de poseedores de un metabolismo de sangre caliente. A lo largo de los últimos años (y no tan últimos) se han desarrollado múltiples teorías y controversias, aunque en la actualidad se converge en la idea de que los

pequeños terópodos avanzados, muy próximos ya a las aves, tendrían esta característica, que por otra parte resultaba imprescindible para el movimiento de aleteo, que exige un consumo energético elevado. El resto serían de sangre fría, aunque algunos habrían desarrollado, en un camino evolutivo hacia el metabolismo conocido como de sangre caliente, una especie de pilosidades que, además de poder ser utilizadas como antenas sensoriales, podrían servir para regular la temperatura.

Sin embargo, sorprende que estos grandes saurios pudieran soportar climas fríos o requerimientos energéticos altos siendo de sangre fría, característica que apunta a metabolismos muy lentos.

Quizás lo que parece una incongruencia se explique parcialmente con la relación gigantismo-temperatura. El hecho de tener un tamaño gigantesco habría desarrollado en los dinosaurios que lo poseían algún tipo de regulación térmica especial. Pensemos que al incrementar el tamaño de un cuerpo, su masa, que es donde se genera el calor metabólico, varía con el cubo del factor de escala (x^3), mientras que la superficie corporal, que es por donde se regula y pierde el calor, aumenta sólo con el cuadrado (x^2). En los cuerpos pequeños o medianos esto no debe ser un problema, pero con el crecimiento se puede llegar a un factor de escala por encima del cual los cuerpos, literalmente, se abrasarían en sus propias ascuas.

Ahora bien, hay un punto intermedio que también puede ser provechoso para los animales de metabolismo lento, de sangre fría. Y tiene que ver con el hecho de que el calor corporal puede controlarse también a través de las bajas temperaturas que se producen por la noche. Es el proceso inverso, aunque térmicamente semejante, al que practica cualquier reptil que necesita exponerse por las mañanas al sol para ganar las calorías que relancen su metabolismo frenado por el frío de la noche. En la caída del sol, un animal de gran volumen sobrecalentado por la actividad diurna, a medida que se adentra la noche, experimentaría un proceso de enfriamiento gradual del cuerpo con la bajada de temperatura ambiente, modulado con una inercia, un retraso. Puede ser que el retraso sea suficiente como para que a lo largo de la noche se mantenga un cierto calor corporal, de forma que con la salida del sol aún se tenga una temperatura elevada, lo que reflejaría una situación muy semejante al que produce el metabolismo rápido de los animales de sangre caliente.

La consecuencia que se puede deducir de ello es que, a pesar de que los dinosaurios más voluminosos pudieran tener un metabolismo de sangre fría, un metabolismo basal bajo, en cierta medida se podrían comportar

como animales de sangre caliente. Cuanto mayor sea la inercia, más se retrasará el enfriamiento nocturno y disminuirá también la velocidad de calentamiento diurno, de forma que algunos dinosaurios podían tener una variación de temperatura corporal a lo largo del día de tan sólo unos 2 o 3 grados. Una regulación por inercia térmica que haría una función equivalente a la regulación por metabolismo de los mamíferos.

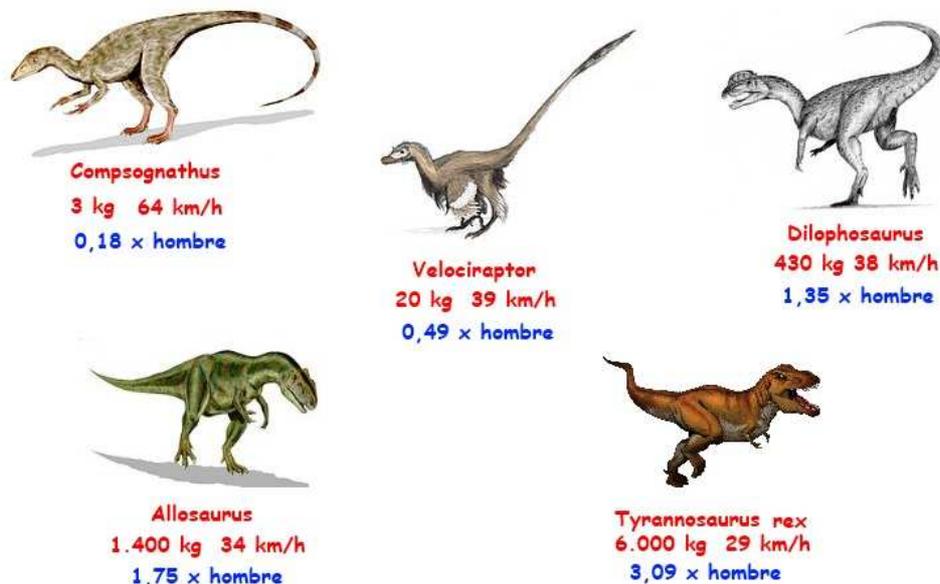
En 2012 se reportaron los resultados⁽⁷³⁾ de unas investigaciones (Meike Köhler et al, en colaboración con investigadores del Institut Català de Paleontología) que parecen aportar datos que pudieran poner un grano de arena más a favor de los que cuestionan la condición de que la mayoría de dinosaurios fueran animales de sangre fría. Uno de los principales argumentos para defender esta tesis venía de la existencia de las *líneas de parada de crecimiento* de los huesos. Estas líneas son, al igual que los círculos de crecimiento en los árboles, un indicativo de cambios de condiciones climáticas o de hábitos de los animales que siempre se habían asimilado a los de sangre fría. Y marginalmente, a alguno de sangre caliente con ciclos de hibernación. Se suponía que se producía un paro estacional de crecimiento cuando el animal, en momentos de poca abundancia de recursos, era incapaz de mantener constante su temperatura corporal. Pero se ha descubierto, rompiendo lo conocido hasta la fecha, que este tipo de discontinuidades en el crecimiento de los huesos es también muy común en algunos animales de sangre caliente. Con ello no se invalidaría la idea de que los dinosaurios fueran de sangre fría en su mayoría, aunque sí se debilita un pilar fundamental de la tesis.

Otro estudio⁽⁷⁴⁾ publicado en 2005 acerca de las tasas de crecimiento del dinosaurio *Plateosaurus engelhardti* y la incidencia de ello en sus huesos, parece que permite asegurar que esta especie personifica una etapa primitiva en el proceso de la endotermia. Vivió durante el Triásico tardío lo cual indicaría una fecha muy temprana para la aparición de este tipo de metabolismo.

Quizás pudiéramos estimar en un grado cualitativo el tipo de metabolismo de los dinosaurios, si caliente o frío, analizando su capacidad de correr y las velocidades que pudieran alcanzar, con la idea de que es lógico pensar en una proporcionalidad entre velocidad del paso y metabolismo. Hay que adelantar que los resultados alcanzados en diversos estudios no han aclarado la controversia entre biólogos endodérmicos, sangre caliente, y ectodérmicos, sangre fría.

Los cálculos se hacen en base al análisis de la geometría de las variadas huellas fosilizadas que se han encontrado. Comenzando por los estudios⁽⁷⁵⁾ realizados ya en 1976 por el zoólogo inglés McNeill Alexander, quién dedujo una fórmula que ajusta con bastante exactitud para todos los vertebrados la longitud de la zancada con la de la extremidad que la realiza; hasta modernos análisis dinámicos mediante modelos que robotizan la anatomía de los animales estudiados como el realizado⁽⁷⁶⁾ por los profesores de la universidad de Manchester William Irvin Sellers y Phillip Lars Manning en 2007. Todos llegan a condiciones generales muy homogéneas: generalmente los dinosaurios con menor masa corporal son los que debían alcanzar una mayor velocidad punta absoluta durante la marcha. Hasta cierto punto es una conclusión lógica, al menos en lo que se refiera a los animales voluminosos, ya que tiene que haber algún límite en la resistencia de los huesos frente al estrés del “golpeteo” en el trote o el galope: un mayor peso corporal supone unos mayores esfuerzos dinámicos que se incrementan al aumentar la velocidad de marcha.

Lo anterior refuerza la idea de que pudo ser que en los dinosaurios pequeños se iniciara la evolución hacia animales de sangre caliente, circunstancia que aprovecharon aquellos que más tarde consiguieron volar, los ancestros de las aves.



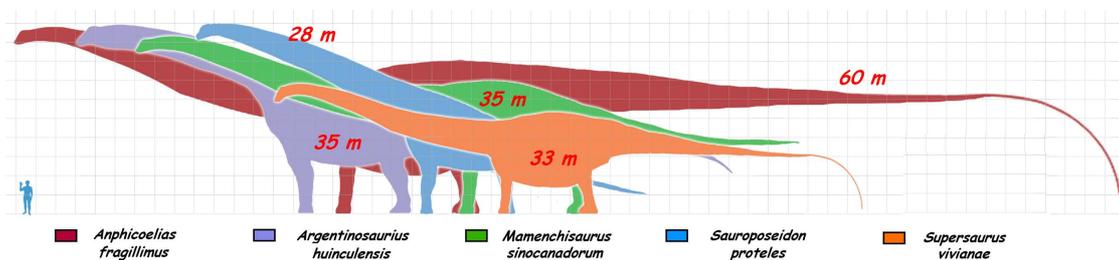
velocidad del recordman de los 100 metros Usain Bolt: 36 km/h

En azul, la proporción entre la longitud de la extremidad de cada uno de los dinosaurios y la del hombre (imágenes a partir de Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Como curiosidad, en la figura anterior se apuntan los resultados del estudio de los profesores de la universidad de Manchester, Sellers y Manning, mencionado un poco más arriba, sobre las posibles velocidades de diversos dinosaurios.

En esta figura, si modulamos las velocidades estimadas para cada una de las especies de dinosaurios teniendo en cuenta la relación de la longitud de extremidades con la del hombre, nos podemos hacer una idea más próxima de si las velocidades que podían desarrollar eran grandes o moderadas. A fin de cuentas para cualquier comparación contamos con el estándar que nos da las condiciones de nuestro cuerpo, tanto en geometrías como en tiempos. A la vista de esto, el pequeño *Compsognathus* debía ser veloz como el viento (de hecho desarrollaría la velocidad equivalente a la del galgo) mientras que el gigante *Tyrannosaurus rex* marcharía con un ritmo semejante al del oso polar, o haciendo una abstracción según longitudes de extremidades a unos 10 km/h-equivalente hombre, no muy rápido, sin duda.

Pasemos ahora al tema del gigantismo. Lo primero que hay que decir es que no todos los dinosaurios tenían un cuerpo desmesurado, los había del tamaño de una gallina, aunque por lo general podemos decir que tendrían un tamaño un orden de magnitud superior al de los otros vertebrados coetáneos. Aunque sus fósiles se han perdido, se supone que el mayor conocido hasta ahora es el *Amphicoelias fragillimus*, de finales del Jurásico, con una longitud de entre 40 y 60 metros, una altura de 21 y un peso aproximado de unas 135 toneladas, el mismo de 15 elefantes juntos. Le seguiría en tamaño el *Argentinosaurus*, del que sí se tienen buenas evidencias, que vivió en el siguiente periodo, el Cretácico, con un peso de unas 90 toneladas y una longitud de 40 metros. Sus vértebras tenían una longitud de 1,3 metros y la tibia alrededor de 1,6 metros.



Los dinosaurios más grandes conocidos (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

El gigantismo tiene un inconveniente que lo debería limitar. Usando el mismo camino argumental al que acudíamos al hablar de la inercia térmica de los dinosaurios, somos capaces de entender el punto crítico al que se

llegaría cuando la masa corporal crece al cubo del factor de escala mientras que la sección ósea que asegura la resistencia estructural se incrementa al cuadrado del factor de escala. Y el punto crítico es aquel a partir del cual el hueso colapsará bajo el peso del cuerpo. Pero hay otro problema más sutil. La masa, y por tanto el metabolismo, se incrementa x^3 , mientras que la sección de las arterias y venas que llevan oxígeno y alimento a las células y les retiran los residuos innecesarios y tóxicos, se incrementa sólo x^2 . Problema físicamente igual a lo comentado unos párrafos más arriba sobre el mantenimiento del calor corporal de los grandes dinosaurios.

A medida que el margen de seguridad se va agotando no queda más remedio que rebajar el metabolismo: proporcionalmente menos alimento, menos oxígeno y vida más larga pero menos activa. O de forma más poética, como define el periodista norteamericano George Jonson, *los corazones de todos los animales darán los mismos latidos a lo largo de sus vidas: la diferencia es que los pequeños se dan más prisa para ello.*

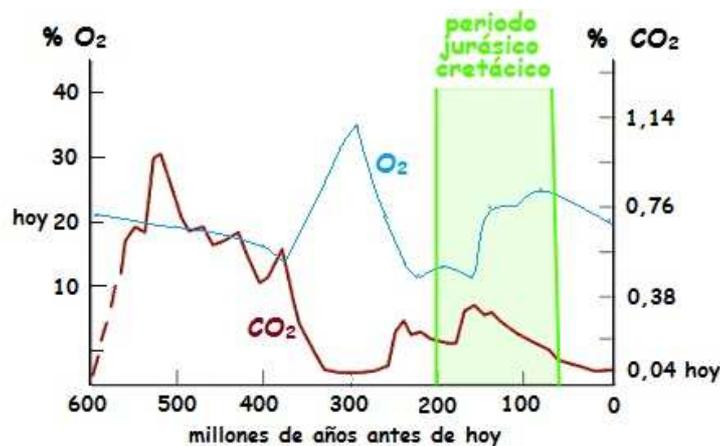
Hay innumerables estudios sobre el tema, de los que quiero destacar el que pudo ser el inicial, del suizo Max Kleiber, quién hacia 1930 dedujo y propuso lo que luego quedaría como su famosa ley, que establece que para la mayoría de organismos, ya sean animales o plantas, el logaritmo del metabolismo basal (energía diaria que necesita un organismo) es proporcional al logaritmo de su masa corporal, siendo esta tasa de proporcionalidad de $3/4$. El metabolismo basal crece a menor ritmo que la masa.

Volvamos al gigantismo particular de los dinosaurios. El hecho de que las grandes morfologías en ellos hayan sido viables durante millones de años, mucho más tiempo que el que ha durado la existencia de otras especies que consideramos exitosas como el *Homo*, indica que estaban muy bien adaptadas a sus ambientes.

De todas formas, por aquella época el gigantismo no era sólo patrimonio de los dinosaurios. Los *ictiosaurios* pudieron llegar a los 23 metros. Los *plesiosaurios* más grandes tenían las mandíbulas de tres metros de largo, y pudieron haber alcanzado más de 15 metros de longitud, pesando más de 10 toneladas. En Inglaterra se han encontrado vértebras y dientes que pueden pertenecer a especímenes de 22 metros de largo y que quizás pesaban 20 toneladas. Y algún *pterosaurio* pudo medir más de diez metros de envergadura, así como los *cocodrilos fitosaurios* que podían medir también más de diez metros.

¿Por qué pudieron producirse estos crecimientos desmesurados? Hay teorías para todos los gustos, pero la más aceptada parece estar relacionada con los índices atmosféricos de oxígeno durante el Jurásico y Cretácico. Y veremos que hubo suficiente materia y energía, o lo que viene a ser lo mismo, carbono y oxígeno para crecer.

Una gran participación del oxígeno en la composición de gases atmosféricos hace que la presión parcial del mismo sea superior, y por tanto sea más fácil la difusión del O_2 en los tejidos orgánicos. Ya comentamos el espectacular tamaño de las libélulas del Carbonífero, que lo atribuíamos a la superabundancia de este gas. En los insectos hacía posible que penetrasen a través de tráqueas más largas, y en los animales respiradores pulmonados hace que la transferencia de este gas hacia la sangre sea mayor y que por tanto haya más oxígeno disponible para el metabolismo. Ya en el anterior capítulo 8 decíamos que el oxígeno, entre otras funciones, es el receptor final en la cadena de electrones base en la generación del ATP, verdaderas pilas de energía en los procesos biológicos animales. A mayor energía, un metabolismo más activo y una consolidación superior de los alimentos. La consecuencia fue un mayor tamaño corporal. No pasó con todos los animales de la época, lo cual no es de extrañar ya que la selección natural no tiene preferencias y condiciona y tutela cualquier tipo de estrategia viable.



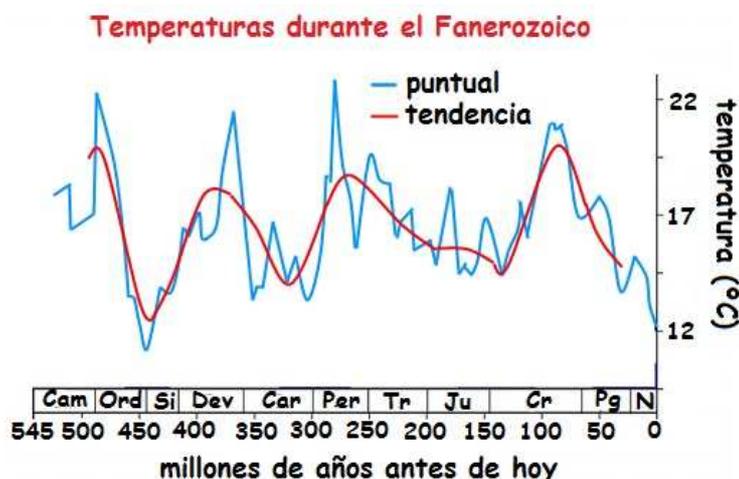
Pero es que hay más relacionado con las condiciones atmosféricas. En la curva anterior podemos ver que también los niveles de CO_2 fueron elevados durante el Jurásico (aunque luego decayeron en el Cretácico). Ya sabemos que debía ser consecuencia de la gran actividad geológica y volcánica del momento. Esto, más la recuperación del clima húmedo, pudo dar alas al mundo vegetal. Sabemos también que progresivamente iban volviendo los bosques húmedos y tropicales, y que el clima benigno favoreció la extensión de las plantas hasta latitudes elevadas. Sin dudas la

función clorofílica incrementaría su volumen y quizás eso fuera lo que propulsó las altas concentraciones de oxígeno. No importa cuales fueran las causas: la realidad es que las plantas crecieron en tamaño y extensión, aportando a sus organismos mayores cantidades de carbono que alterarían la proporción de este elemento con el nitrógeno en perjuicio de este último, que lo tenían que conseguir a través de una compleja química en sus raíces.

Es una obviedad el decir que los animales necesitan alimento. Pero es que es cierto que los dinosaurios, muchos de ellos herbívoros, comerían plantas para satisfacer, entre otras, sus necesidades de nitrógeno. Plantas sobrecargadas de carbono, ¿qué tal si la relación de C/N fuera 2/1 en vez de 1/1? Pues que los dinosaurios, y en general todos los herbívoros, habrían asimilado el doble de carbono del que necesitaban. La consecuencia fue un embolsamiento de carbono en el organismo, y eso ya sabemos que se hace en forma de grasas, azúcares y proteínas, entre otros, las bases de la masa orgánica de un cuerpo. Y a mayor tamaño, más necesidad de alimento y más almacenamiento de carbono. La competencia por la comida debió ser fuerte a pesar del incremento de las masas vegetales. Quizás fuera esto lo que favoreció algunos cuellos tan largos que permitían acceder a espacios con hojas inalcanzables para otros.

Lo que nos posibilita plantear una curiosa teoría sobre los dinosaurios propuesta recientemente.

Después de lo dicho acerca de los grandes dinosaurios podemos imaginar que debían tener un estrés alimentario importante: Grandes volúmenes corporales, necesidad de mucho alimento vegetal aprovechándose cualquier cosa masticable, conductos digestivos largos, potentes estómagos rellenos de bacterias digestoras que fermentaban las masas ingeridas, digestiones pesadas, muchos gases y metano...



Y eso, ¿qué tiene que ver? Para verlo retomemos la anterior vieja y conocida curva.

Como podemos ver en la figura anterior, en la primera mitad del Cretácico hubo un rebote de las temperaturas globales con un cambio hacia valores más elevados. En una entrada posterior, la "42. *El Cretácico y sus plantas*", haremos una descripción más detallada de cuáles pudieron ser las causas. Aquí sólo apuntamos el hecho.

Los fisiólogos británicos David Wilkinson y Graeme D. Ruxton, en colaboración con Euan Nisbet, profesor de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Londres y experto en gas metano, han presentado un estudio⁽⁷⁷⁾ en 2012 sobre la ecología de los grandes saurópodos planteándose la siguiente hipótesis: estos animales podrían haber producido, como lo hacen las vacas modernas, más metano que el conjunto de todas las fuentes actuales, tanto naturales como antropogénicas.

Según esta opinión, los saurópodos habrían emitido unos 520 millones de toneladas de metano al año, cifra comparable a la de las emisiones modernas. Antes de la revolución industrial, las emisiones de metano eran de unos 200 millones al año. Los animales rumiantes modernos producen un total de entre 50 y 100 millones de toneladas por año. Así que bien pudieron ser los dinosaurios unos importantes corresponsables del calentamiento global del Cretácico.

Y un último apunte de estos sorprendentes animales. De los restos fósiles se puede inferir un probable comportamiento social de los dinosaurios. Se han encontrado nidadas de huevos en donde coincidían huesos de animales jóvenes y de adultos. La explicación que se da a este escenario tan alejado del de los reptiles es que mayores y pequeños convivían un determinado periodo de tiempo en grupo, lo que demostraría la existencia de un periodo de cuidado y atención de los padres sobre sus crías, como sucedía en el caso del *Maiasaura*. También la disposición y vecindad de varias nidadas parece sugerir que algunas especies de dinosaurios vivían en grandes agrupaciones semejantes a las que forman en la actualidad los pingüinos. De la observación de algunas trazas fósiles del caminar de estos animales se ha constatado que algunas especies como el *Hadrosaurus* se desplazaban en grandes manadas formadas por individuos adultos y jóvenes. Incluso algunas trazas parecen indicar que en estos grupos los más jóvenes quedaban protegidos en el interior del cordón externo que formaban los adultos. Se han encontrado muchos yacimientos en donde se mezclaban fósiles de múltiples individuos lo que parece indicar que la

catástrofe que los enterró sorprendió a una agrupación social. Hay también serias evidencias de que algunos de ellos, como el pequeño *Velociraptor*, cazaban en grupo.

Lo que hemos visto en este capítulo hace pensar que los dinosaurios fueron un grupo de animales con algo especial. Parece que en la clasificación taxonómica quedan inmersos y diluidos en el gran grupo de la clase saurópsida, cuando manifiestan unas características tan especiales que ya por ellos mismos deberían constituir una clase independiente, como así lo hacen sus hermanos los mamíferos y reptiles, y aún más ¡sus hijas las aves! El hecho de haber desaparecido hace unos 65 millones de años puede que haya infravalorado una realidad filogenética.

De esta desaparición hablaremos cuando llegue su momento. En el capítulo que sigue continuaremos su historia a caballo entre el Jurásico y el Cretácico, que es cuando nuevas habilidades les llevaron a conquistar los cielos.

41. De los dinosaurios voladores a las aves

En los siguientes párrafos vamos a tratar un tema con el que completaremos el periodo Triásico, pero que se extiende en casi su totalidad sobre el siguiente, el Cretácico. Me voy a tomar la licencia de adelantarlo aun sin haber introducido la geología y climatología de este último periodo como ha sido habitual para los demás vistos hasta ahora. El motivo es que el tema complementa y cierra el círculo de lo iniciado en el capítulo anterior sobre los dinosaurios, de forma que hablaremos de cómo estos animales tan especiales conquistaron el cielo, más allá de lo que hacía mucho tiempo habían hecho los insectos, y un poco menos los reptiles Pterodáctilos.



Comencemos por el final. Los grandes dinosaurios nos llevan de la mano hasta el pequeño *Archaeopteryx*, el “ala antigua”, la última maravilla del Jurásico: ¿Es un dinosaurio? Quizás. ¿Es un ave? Posiblemente. La verdad es que es el eslabón que une el clado reptil con una nueva clase animal. Un clado es el conjunto de especies e individuos que provienen de un antepasado común. Taxonómicamente, es decir, en la ciencia de la clasificación, a *Archaeopteryx* se le conoce como un ave. Quizás la primera de todas ellas.

El primer fósil se encontró en 1861 cerca de Langenthalheim, en Alemania. La clara evidencia de plumas en sus articulaciones supuso un revuelo en el mundo del conocimiento evolutivo, ya que parecía haberse encontrado el eslabón perdido entre el dinosaurio y las aves. Eran los momentos del inicio de la batalla darwiniana. Después de este primer fósil se han encontrado diez más, todos ellos en Alemania, el último en 2011.

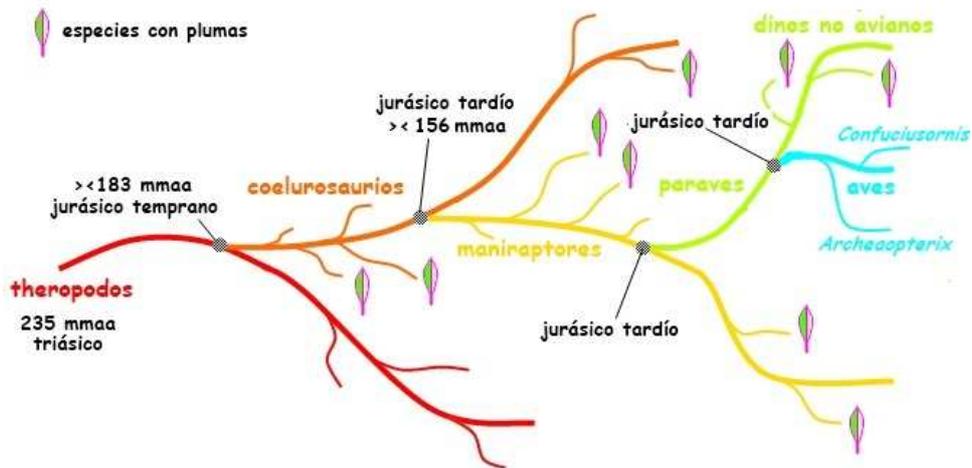
La existencia de estos fósiles nos alimenta la curiosidad, de forma que vamos a intentar enhebrar un cierto hilo de acontecimientos: desde los dinosaurios a las aves.



*Fósil de Archaeopteryx del museo de la Universidad Humboldt, en Berlín
(Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)*

Ya sabemos por lo dicho hasta ahora que el árbol filogenético de estos últimos animales se enraíza en los dinosaurios terópodos. En su clado Tetanurae, los “*colas rígidas*“, de hace unos 195 millones de años, encontramos al primer ancestro común conocido de todas las aves. Si seguimos por el árbol filogenético llegaremos tras unas pocas derivaciones, más o menos hace unos 175 millones de años, al clado de los Coelurosauria, los “*reptiles de cola hueca*“. En este clado vamos a encontrar los ejemplares conocidos de dinosaurios emplumados. Especímenes que vivieron desde hace unos 163 millones de años, cuando aparece el ancestral *Pedoppena*, “*pie de pluma*“, hasta los “*cercanos*” 65 millones de años, momento en que desaparecieron todos ellos, dejando paso libre a sus hijas las aves.

Dentro del clado coelurosaurio continuó la cadena evolutiva. Hace unos 155 millones de años se desgajan los Maniraptora y poco después los Paraves. Estos engloban a los *dinosaurios no avianos*, aquellos que representan la última forma de transición entre dinosaurios clásicos y aves, y a las *aves verdaderas*. Entre estas últimas se encuentra nuestro amigo *Archaeopteryx*, del que presumimos una antigüedad de 150 millones de años.



Evolución de los dinosaurios hacia las aves

Destacamos aquí lo que parece ser el santuario mundial de los fósiles de las aves primitivas. Se trata del yacimiento chino de Yixian en el que a principios de los años 90's del siglo pasado comenzaron a estudiarse multitud de ejemplares de los estadios iniciales de la clase aves, entre los que destaca *Confuciusornis sanctus*, la “ave santa de Confucio“, que vivió a lo largo de unos 15 millones de años en el Cretácico inferior, hace ahora unos 120 millones de años.



*Fosil de Confuciusornis sanctus del Museo de Ciencia de Hong Kong
(Wikimedia, CC SY-BA 3.0)*

A pesar de que hay una manifiesta mayoría que apoya la teoría de la procedencia dinosauria de las aves, para algunos las evidencias basadas en los fósiles conocidos no son suficientes como para calmar el debate que explique como se pasó de unos a otros. Incluso hay algún científico que aboga por la existencia de dinosaurios consecuencia de una evolución

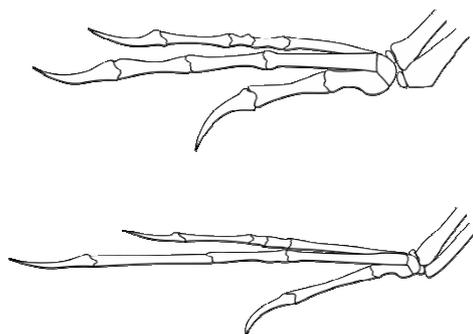
“regresiva” a partir de un ave. No obstante, cada nuevo descubrimiento afianza más la idea original, aunque los estudios genealógicos de detalle siguen adelante y aún son objeto de análisis.

La realidad es que en unos 50 millones de años de cambios, la evolución modeló de forma muy rápida el tamaño y forma de algunos dinosaurios: desde los 165 kilos de los Tetanurae a los escasos mil gramos del *Archaeopteryx*. Una hipótesis⁽⁷⁸⁾ que explicaría estas remodelaciones se apoya en la oportunidad que supuso para algunos dinosaurios el conquistar la libertad, protección y nuevos recursos alimenticios que ofrecían las alturas de los árboles.

El proceso habría exigido entre otros, tal como realmente se observa en la realidad, una disminución corporal. A la par que cerebros proporcionalmente mayores con los que gestionar el movimiento en el más complicado medio de la foresta, lo que impulsaría cráneos más grandes mediante ontogenias pedomórficas -como explicamos más abajo- y con hocicos más cortos. La necesidad de perfeccionar la visión tridimensional para moverse con eficacia en el nuevo medio habría llevado al crecimiento de los ojos. Se debió potenciar la función aislante de las plumas para permitir la actividad nocturna y el alargamiento de las extremidades para favorecer los saltos entre árboles. Precisamente el fenotipo que observamos en las aves que nos rodean.

Y no nos olvidemos de algunas características morfológicas que se observan en los fósiles. Los *Neotheropoda*, muy cercanos a las aves aunque eran aún animales carnívoros, ya presentaban la bipedestación y en sus patas tenían solamente tres dedos como las aves modernas. En las manos habían perdido el quinto dedo, mientras que el cuarto quedaba muy reducido. Poco a poco las semejanzas en las estructuras del esqueleto se fueron aproximando. Cráneo apuntado, cadera de nuevo con el pubis hacia detrás, patas largas y delgadas, fusión de las clavículas para formar la fúrcula así como la transformación anatómica de las extremidades superiores hacia la función “vuelo”. Evidentemente, y como prueba de cargo esencial, la existencia de plumas, que fueron evolucionando con el paso del tiempo desde formas pilosas hasta las que conocemos hoy en día. Por no olvidar la evolución de los comportamientos como la ingestión de piedras para facilitar la molienda de los alimentos antes de la digestión, la nidificación y el comportamiento en el cuidado de las crías, o la sociabilidad.

Demos un salto hasta los dinosaurios maniraptores, “*con manos de ladrón*”, del grupo de los terópodos. Tenían unos brazos y manos alargadas, las clavículas unidas en forma parecida a la espoleta de las aves, una cola larga y rígida, plumas y una cadera de ave con el pubis hacia atrás. Se supone que los especímenes más primitivos pasaban la mayor parte de su tiempo en los árboles, aunque la casuística de la morfología de estos animales es muy extensa.



Extremidades típicas de los maniraptores (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Como un ejemplo, el “*pequeño rapaz*” *Microraptor*, que fue un dinosaurio de cuatro alas, del tamaño de una paloma, que vivió hace unos 130 millones de años. El plumaje fosilizado del dinosaurio, de matices azul y negro, es el registro más antiguo del color de las plumas iridiscentes. Al igual que muchas aves modernas, las utilizaba, probablemente, para enviar señales visuales de tipo social. Se han hecho estudios también sobre la cola de este dinosaurio, describiéndola como una superficie más estrecha de lo que se pensaba, con dos plumas alargadas. Los científicos creen que la pluma de la cola era ornamental y que, probablemente, evolucionó para el cortejo y otras interacciones sociales y no para la aerodinámica.

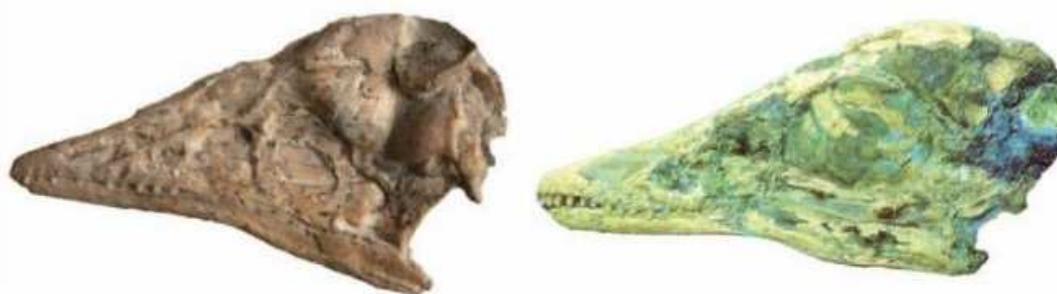


Representación artística del Microraptor mmartinyuk (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Los microraptores eran muy pequeños, de un kilo de peso. En el otro extremo de los dinosaurios emplumados tenemos a *Yutyrannus huali*, coetáneo del microraptor, que alcanzaba casi la tonelada y media de peso.

Con el tiempo habían desarrollando cambios anatómicos que les permitieron saltar al medio aéreo, lo cual se debió producir antes de la aparición de las aves verdaderas, ya que algunos especímenes disponían de alas bien desarrolladas e incluso protoalas en las piernas que las utilizarían para el planeo.

Un estudio⁽⁷⁹⁾ de la Unidad de Paleontología de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) incide en la evidencia de la relación dinosaurio-ave, ya que demuestra que la evolución del cráneo de las aves modernas presenta una correspondencia con el fenotipo de los cráneos de los dinosaurios jóvenes, hecho producido al irse retrasando el camino de maduración joven/adulto en las aves con relación al que seguían los dinosaurios carnívoros terópodos. A este fenómeno, muy habitual en el mundo animal, se le conoce como pedomorfismo, es decir, “*con forma infantil*”. Con eso, poco a poco las aves llegaron a retener cuando eran adultas las características de un dinosaurio joven: cuerpo más pequeño, un acortamiento de la cara en donde se apuntaba poco a poco el pico y unos cráneos proporcionalmente más grandes en donde albergar un cerebro preparado para gestionar las múltiples decisiones que comporta un vuelo.



A la izquierda cráneo de un Archaeopteryx juvenil, muy semejante a la de un ave adulta actual. A la derecha el cráneo de Archaeopteryx adulto (Imagen: UAM y universidades de Harvard, Texas y New York, CC 2.5)

Con ello llegamos al “*ala antigua*”, *Archaeopteryx*, que apareció hace unos 150 millones de años. Fue una criatura con un tamaño similar al de un cuervo moderno, unos 35 centímetros, de cabeza pequeña y ojos grandes. Las extremidades eran largas y delgadas, con tres dedos en forma de garra en cada una de las manos alargadas y con los pies típicos de las aves. Los

huesos de la parte inferior de las patas eran largos e indican que se trataba de un animal corredor. Con dientes puntiagudos en las mandíbulas y una cola ósea larga, características estas últimas que le asemejan a un dinosaurio terópodo.



Imagen artística de Archaeopteryx (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

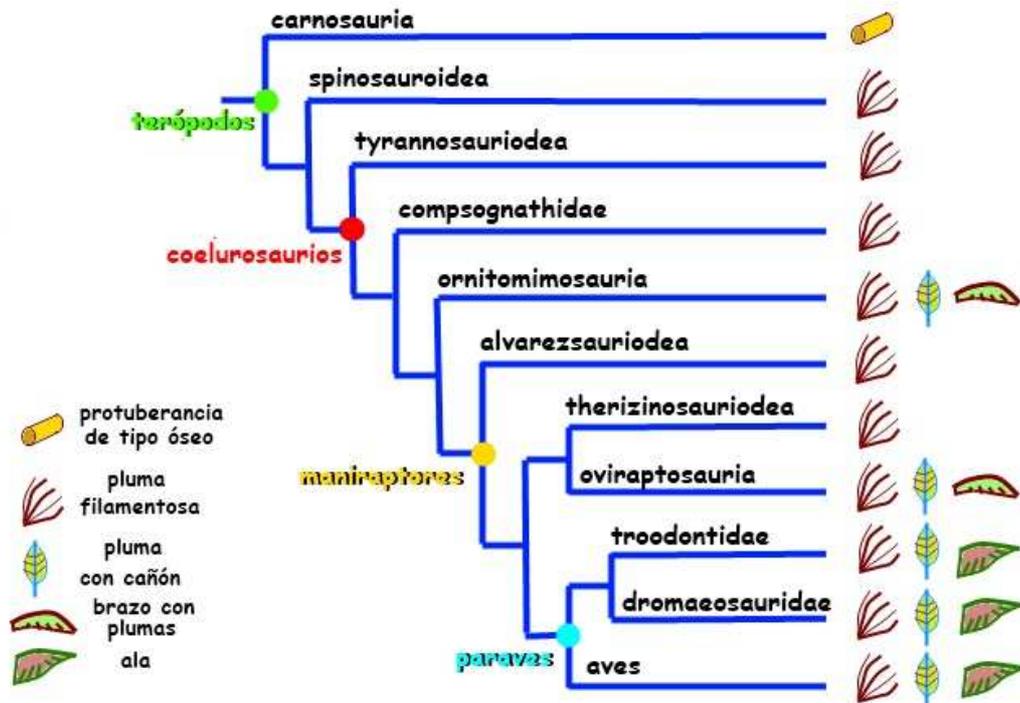
Pero tenía también dos peculiaridades que son exclusivas de las aves: una espoleta bien desarrollada, formada por la unión de las dos clavículas, y las plumas que caracterizan a las aves en las extremidades anteriores y sobre la cola, aunque su esternón, hueso donde se anclan los músculos motores del vuelo, era diminuto a diferencia del de las aves modernas. El hecho de que, casi con toda seguridad, esta ave antigua tenía sangre caliente como sus familiares modernos, apuntaría hacia un metabolismo activo que generaba suficiente energía como para soportar el vuelo.

No se sabe con certeza si sólo realizaban un planeo o si podían batir las alas con fuerza y volar. En general estas son las dos alternativas en disputa para explicar el origen del vuelo en los animales de su época. Se supone que para volar batiendo las alas se necesita una fuerte estructura muscular pectoral y una quilla donde se afiancen los músculos. Ya sabemos que no disponían de esta estructura ósea, por lo que es probable que no hicieran vuelos largos ayudados por la fuerza de sus alas. Una segunda posibilidad es que su estrategia de caza fuera el otear desde lo alto de los árboles y, una vez observada la presa, sorprenderla desde arriba mediante un planeo. Pero los bosques donde habitaba este animal eran ralos y de árboles no más altos de tres metros, por lo que esta segunda posibilidad también tiene un

soporte débil. Una alternativa más plausible sería el que acechara a sus presas desde el suelo, arropado por los arbustos, y se apoyara en el batir de sus alas para agilizar el último salto, que así produciría un movimiento más versátil y más exitoso a los propósitos de la caza. En resumen, un camino de lenta evolución a través de distintas conquistas: correr, saltar, controlar el desplazamiento aéreo y por fin volar.

Ya sabemos que los *Archaeopteryx* no fueron los primeros animales con plumas, ya que estas “adornaban” a algunos terópodos mucho antes de que se hubiera inventado la capacidad de volar. Incluso parece ser, según un informe⁽⁸⁰⁾ publicado en la revista Science en 2014, que en especímenes de dinosaurios del Jurásico medio del orden ornitisquia, prima lejana de la terópoda, ya se habían desarrollado estructuras semejantes a las plumas. Lo que para algunos sugiere la existencia de estos adminículos ya en el Triásico, hace unos 220 millones de años.

Entonces, si no se crearon para volar, ¿cuál fue el estímulo medioambiental que permitió el desarrollo de las plumas? Bien pudiera haber sido para desarrollar una función de aislamiento térmico en algún momento del camino hacia la sangre caliente. Sin embargo hay sus dudas sobre esta explicación, ya que se han encontrado fósiles de aves del Cretácico más actuales que los *Archaeopteryx* que parece ser no habían desarrollado todavía un metabolismo de sangre caliente.



Evolución de las plumas en los dinosaurios del jurásico/cretácico

Una tercera explicación se ancla en el hecho de que el proceso biológico por el que se generan las plumas no es nada especial. Es un diseño muy antiguo, posiblemente más antiguo que el que dio a luz a las protecciones de los placodermos o a los “dientes” de los conodontos ¿Recordáis lo que ocurría en aquel antiguo periodo Silúrico? En el capítulo correspondiente, el 29, decíamos: *“Posteriormente a la aparición de la mandíbula aparecieron los dientes como excreciones óseas de la piel que la recubría, formados a partir de una invaginación en las dos capas del tejido cutáneo, derivando una de ellas en una estructura interna con dentina y otra en una externa de esmalte”*.

Este tipo de mecanismo es común en la generación de dientes, pelos, escamas, plumas, glándulas sudoríparas e incluso de las glándulas mamarias. El inicio se produce cuando en un determinado momento, dirigido por proteínas y genes específicos, en dos capas de tejido epitelial que se encuentran físicamente próximas una a otra se inicia un proceso por el que las células se dividen y crecen, haciendo que las capas vayan cambiando de forma. Se produce un plegado que se invagina y se generan un tipo particular de proteínas que favorecen el proceso y determinan el resultado final. Es evidente que este proceso común es la prueba de que órganos tan diferentes como los dientes, plumas y mamas están intrínsecamente unidos por la historia biológica. Es decir, una pluma sería simplemente una variación de una solución evolutiva ancestral.

Si buscáramos en un ancestro común de la familia *Archosauria*, de donde provienen los dinosaurios, sus hijas las aves y los cocodrilos, posiblemente hallaríamos ya pistas de las plumas. Quizás no evidencias visibles de animales emplumados, sino proteínas y desarrollos embrionarios dirigidos por genes que se repiten curiosamente en cocodrilos y aves. Y así es.

Cocodrilos y dinosaurios se separaron hace 230 millones de años. Y a pesar de ello los cocodrilos aún conservan la impronta de las plumas, como se ve en sus embriones que desarrollan el mismo tejido que en las aves deriva en plumas. También tienen la proteína “queratina de las plumas” con la que fabrican sus escamas, curiosamente semejantes a las escamas que las aves actuales tienen en sus patas.

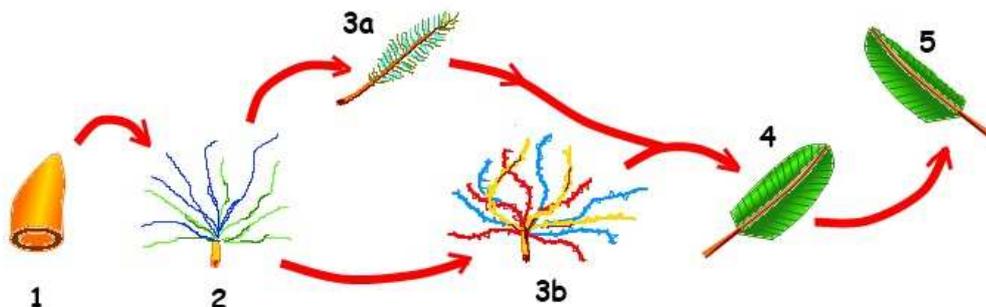
En los embriones de las aves se genera un tejido “escamoso” que se diversifica, por un lado, formando las escamas de las patas, y por otro, formando las plumas. En este caso las escamas embrionarias derivan a filamentos tubulares o barbas, *que son como pelos huecos pero que pueden*

tener derivaciones en toda su longitud, formando desde plumones hasta las plumas de vuelo o de cortejo.

Y este último detalle, las plumas de cortejo, es el que lleva a pensar que el desarrollo de las plumas fue, una vez más, un argumento de selección sexual. En base a que el emparejamiento es más esencial para la vida y transmisión de los propios genes que la estrategia metabólica de sangre caliente o la habilidad de volar, bien pudiera ser que las plumas, unos apéndices que exigen recursos ¿innecesarios? importantes, fueran el primer paso de un desarrollo y transformación de las escamas reptilianas, favorecido por la realimentación de tipo sexual y reproductora que producirían, al estimular a las hembras con su colorido, variación y reflejo de la luz solar. Precisamente en base a estas características estéticas, con posterioridad derivarían a otras funciones. La primera, la de aislamiento térmico, al haber creado un colchón de aire entre el cuerpo y el exterior, efecto reforzado por una capa iridiscente que reflejaba la luz solar. El último paso, sorprendentemente, sería la habilidad que se conquistaría en base a su liviandad y su capacidad de crear superficies de sustentabilidad en el aire: el vuelo.

Con relación a la selección sexual algún científico opina⁽⁸¹⁾ haber encontrado evidencias de ello. Datados a finales del Cretácico, los fósiles de *Ornithomimus* descubiertos en Colorado, Estados Unidos, en 1890, permiten observar que las plumas en los brazos se encuentran sólo en los adultos y no en los individuos jóvenes. Lo que daría pie a que estos aditamentos sólo tuvieran propósito en la fase adulta como elemento de atracción macho/hembra más allá de sus posibilidades para el desplazamiento.

Las mismas plumas presentan una historia de desarrollo evolutivo propia, desde lo que se considera la primera a las actuales, según el esquema siguiente de incremento de complejidad:



Pasos en la evolución de las plumas

La primera pluma sería un cilindro hueco, como un pelo grueso (1). Con el tiempo estos pelos ya más desarrollados se unirían a la caña de la pluma en forma de abanico (2). De esta disposición palmeada, y al aparecer una modificación de las barbas, se pasó a la forma palmeada **3b** o bien a una disposición parecida a las plumas actuales con filamentos a uno y otro lado de la caña (**3a**), pero sin estar aún unidas por pequeños garfios. El siguiente paso evolutivo llevó precisamente a unir las barbas laterales mediante esta disposición tipo velcro, con lo que se ganó en rigidez (4). Finalmente aparecen plumas asimétricas (5), a partir de las cuales se piensa que pudo surgir finalmente el vuelo ya que su especial estructura es la que permite soportar los esfuerzos dinámicos que el vuelo produce en ellas. El *Archaeopteryx* ya presentaba plumas de este tipo.

Con esto dejamos este amplio recorrido de la conquista de los cielos por unos animales llenos de claroscuros, aunque muy especiales, como fueron los dinosaurios. El capítulo que continúa sí va a estar dedicado exclusivamente al periodo que sigue al Jurásico: el Cretácico. A pesar de que el que ahora acabamos se ha tomado la prerrogativa de adentrarse en este último periodo de la era Mesozoica antes del tiempo marcado por el ritmo de este relato. Hablaremos de su geología, climatología y atmósfera, así como de lo que le aconteció en aquellos años a la biota vegetal.

42. El Cretácico y sus plantas

En el capítulo que precede escribíamos acerca de la fantástica conquista del vuelo por parte de los ubicuos y evolucionados dinosaurios. Esa habilidad se había aprendido a partir de que alguna célula epitelial de un antiguo arcosaurio evolucionara a través de un proceso por el que una escama de reptil devenía una especie de pelo, que se fue complicando hasta llegar a ser una pluma. Aquello sucedió, creemos, a lo largo del periodo Jurásico tardío. En la frontera con el Cretácico ya volaban las aves propiamente dichas, y hasta su final, hace 65 millones de años, estos animales siguieron siendo muy abundantes.

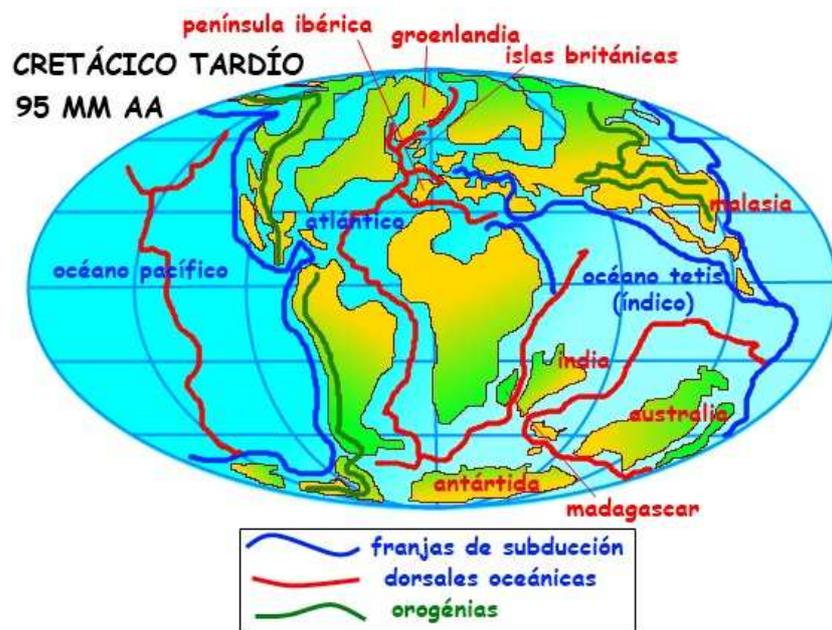
En este nuevo periodo, el Cretácico, que empezó su recorrido hace 145 millones de años, aparecieron las plantas angiospermas y las flores. En tierra siguieron dominando los dinosaurios, mientras que a los mamíferos no les había llegado aún su hora, si bien ya correteaban las familias - taxonómicamente órdenes- a las que estamos acostumbrados hoy en día: monotremas, marsupiales y placentarios.



En 1822 el geólogo belga D'Omalius d'Halloy llamó "*Terreno Cretáceo*" a los afloramientos calizos de la Cuenca de París, que tienen una antigüedad de unos 100 millones de años. La palabra "creta" viene del latín y corresponde a un tipo de roca caliza porosa formada por conchas calcáreas de cocolitos y foraminíferos. De aquí que aquel periodo pasó a llamarse *Cretáceo*, es decir "portador de creta".

A lo largo de aquella etapa la ruptura de Pangea ya era completa, de tal forma que a finales del periodo la disposición continental se asemejaba mucho a la actual.

Sabemos que durante el Jurásico los mares fueron subiendo de nivel gracias a las grandes aportaciones de materiales plutónicos que surgían por las dorsales oceánicas. Las aguas más altas fueron rellenando los huecos que los rifts iban dejando en el desmembramiento de Pangea. Esta tendencia continuó a lo largo de la primera mitad del Cretácico, de forma que el nivel del mar llegó a las mayores cotas nunca alcanzadas, dejando muy poco territorio fuera del agua. En su punto máximo solamente el 18% del planeta lo constituían las tierras secas. Podemos compararlo con el dato de hoy en día, que es del 28%. Es decir, actualmente hay aproximadamente un 50% más de tierras emergidas que en los “peores” momentos del Cretácico.



Contemplemos ahora el mapa de más arriba en el que están dibujadas, como líneas de color rojo, las dorsales marinas que iban motorizando el movimiento de los continentes. Como podemos ver siguiendo su trazado, la actividad geológica debió ser impresionante. Al inicio del periodo, 130 millones de años, prácticamente había dos continentes principales, Laurasia y Gondwana, separados por el mar de Tetis y el Atlántico norte.

Con el paso de los millones de años Gondwana se fue abriendo como un abanico, con el clavillo en posición de polo sur. Al oeste la varilla de Sudamérica que quedaba aislada de Norteamérica. En el centro África, de la que se habían desgajado por el sudeste la Antártica y Australia, todavía unidas. En la grieta intermedia “flotaban” solitarias la India y Madagascar.

Por su parte, Laurasia quedó desmembrada en múltiples territorios, el mayor de los cuales lo constituía la zona “asiática” de Eurasia, a la que ya se le habían unido por el sur los bloques del continente Cimmeria y China.

Una importante masa de agua se extendía desde las aguas del Polo Norte hasta la península de Yucatán y México. Otra vía marina cruzaba África a través de la región del Sáhara central. El mar de Tetis, que anteriormente limitaba con el sur de Europa, creció hasta cubrir las islas británicas, Europa central, el sur de Escandinavia y la Rusia europea.

Mientras las aguas traspasaban de norte a sur las tierras, en las costas oeste sobre el Pacífico -llamémosle ya así- continuaba la formación de las orogénias circumpacíficas americanas.

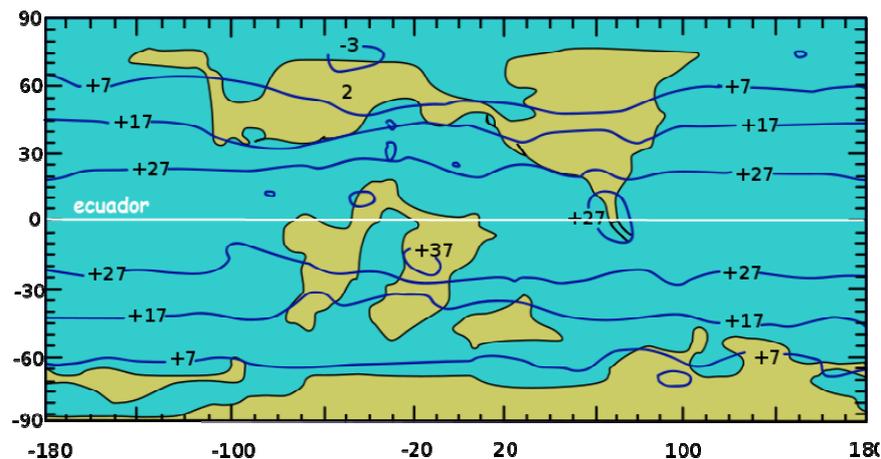
En resumen, la tierra estaba fragmentada en más de doce masas importantes, con canales de agua, amplias plataformas y mares someros por todos los lados, en los que proliferó la vida elemental planctónica y donde se establecieron potentes arrecifes.

Una segunda e importantísima consecuencia de la gran desmembración territorial fue el aislamiento de la fauna. Es de sobra conocido que, para una población, el hecho de permanecer en un ambiente concreto sin intercambios genéticos con otros grupos, en donde las únicas influencias son las del medio particular en donde se encuentra, es un factor evolutivo hacia nuevas formas. A este tipo de *especiación* por aislamiento geográfico se le conoce como *alopátrica*. Y esto era lo que sucedía a mediados del Cretácico cuando Sudamérica era una superisla, como también lo eran África, Antártica/Australia, Madagascar, Norteamérica o Eurasia. No es de extrañar que en cada una de ellas apareciera una fauna distinta, como comentaremos en capítulos posteriores.

La geografía condiciona la fauna y también al clima. Se rompieron las grandes distancias en el continente de Pangea, se fraccionaron las costas, incrementándose las zonas con influencia del mar, y subió el nivel de las aguas, con lo que se acrecentó la superficie de mares someros y de aguas cálidas. Como consecuencia, se fue asentando un clima más oceánico. El crecimiento de los mares llevó emparejada la disminución de la superficie de tierras y por tanto del albedo terrestre: se reflejaba menos radiación solar y la Tierra, por consiguiente, se calentó. A ello se le unieron las importantes emisiones de CO₂ debidas al incremento del vulcanismo por el intenso proceso de fracturas geológicas, lo que acrecentó aún más el efecto invernadero. Como consecuencia se inicia un cambio de ciclo en el que se

le tuerce la tendencia al descenso progresivo de la temperatura media de los últimos periodos. Desaparece por tanto el ligero interludio glaciario, iniciándose una tremenda escalada de la temperatura media en el planeta. Los sedimentos muestran que las temperaturas en la superficie del océano tropical debieron haber sido entre 9 y 12°C más cálidas que en la actualidad, mientras que en las profundidades oceánicas las temperaturas debieron ser incluso de 15 a 20°C mayores. Eso era debido a la intensa evaporación en los mares tropicales, lo que salinizaba sus aguas haciéndolas más densas, por lo que se hundían estando aún calientes. En una visión macro del periodo, más calor y más humedad en general.

Más calor y más humedad, con una distribución geográfica continental y marina más fragmentada, con canales norte/sur que comunicaban todas las masas de agua. Era una situación que favorecía el transporte de calor por las corrientes marinas desde los trópicos a los polos, por lo que las temperaturas globales se hacían más uniformes a la vez que se favorecería también el transporte de humedad atmosférica desde el ecuador a latitudes altas, en donde las lluvias serían más abundantes.



Isotermas en el mapamundi cretácico, en °C (Wikimedia, dominio público)

Sin salirse del contexto general de altas temperaturas, a finales del Cretácico se invierte la tendencia. Era el aviso de que la Tierra empezaba a deslizarse hacia una época llena de episodios glaciares en la que aún vivimos, lo que iba a provocar una progresiva regresión de los mares que tuvo como consecuencia un marcado descenso del nivel de sus aguas.

Las plantas

Las altas temperaturas, la mayor pluviometría y los elevados niveles de CO₂ favorecieron el desarrollo de las masas vegetales. Por otro lado, el

mayor equilibrio térmico entre las diversas latitudes del planeta provocó el que hace unos cien millones de años los bosques se extendieran casi hasta zonas polares. El estudio de los anillos de los árboles fósiles muestra que en aquellos momentos su crecimiento era el doble que en la actualidad.

Este crecimiento fue especialmente grande cerca de los polos, de forma que se han encontrado árboles de la Antártida con un espesor medio de sus anillos superior a los dos milímetros. Los bosques se extendieron como un continuo entre los polos.

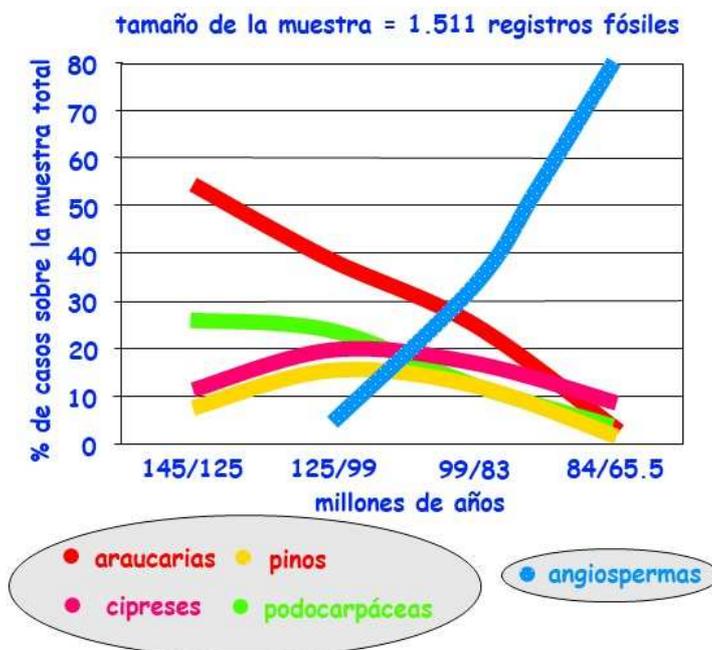
Recordemos de cuando hablábamos del Carbonífero en el capítulo 33 del gran avance que supuso la aparición de las gimnospermas con sus semillas. En este periodo Cretácico siguen presentes, estando representadas principalmente por las coníferas, ya que ginkgos y cícadas experimentaban entonces un franco retroceso.

Sin embargo, el aspecto más importante de la biota vegetal, y que caracteriza a este periodo, es la aparición y pujanza de las plantas angiospermas y con ellas las *primeras flores* y frutos. Etimológicamente su nombre proviene del griego *ἀγγειον*, *ánfora*, y *σπέρμα*, *semilla*, apuntando a su característica de plantas con flor y semillas encerradas y protegidas.



Ilustración basada en los diversos restos fósiles encontrados -más de mil- de Monteschia vidalii, en la que se aprecia la planta y sus flores que desarrollaban una única semilla. Como se explica en el texto, esta planta soporta la evidencia más antigua de flores. (Crédito: Oscar Sanisidro)

Su aparición se produjo en algún momento del Cretácico inferior, siendo el fósil más antiguo conocido⁽⁸²⁾ el de *Monteschia vidalii* -ver la imagen anterior- encontrada en varios yacimientos situados en España y cuya antigüedad se estima entre 130 y 125 millones de años. Lo más curioso de esta planta acuática, que mantenía sus tallos y hojas completamente sumergidos, fueron sus flores que no tenían ni pétalos ni sépalos y que además se polinizaban gracias al arrastre que las aguas ejercían sobre su polen. En China se ha encontrado otra planta semejante, *Archaeofructus sinensis*, de antigüedad parecida, aunque en este caso la polinización se llevaba a cabo a través del aire. Ambas especies permiten pensar que este tipo de plantas acuáticas, abundantes durante el inicio del Cretácico, pudieron ocupar una posición basal en la línea evolutiva del linaje de las angiospermas, tras las que se inició una progresiva difusión y diversificación que las ha conducido hasta sus actuales 250.000 especies, en contraste con las 550 especies de coníferas existentes.

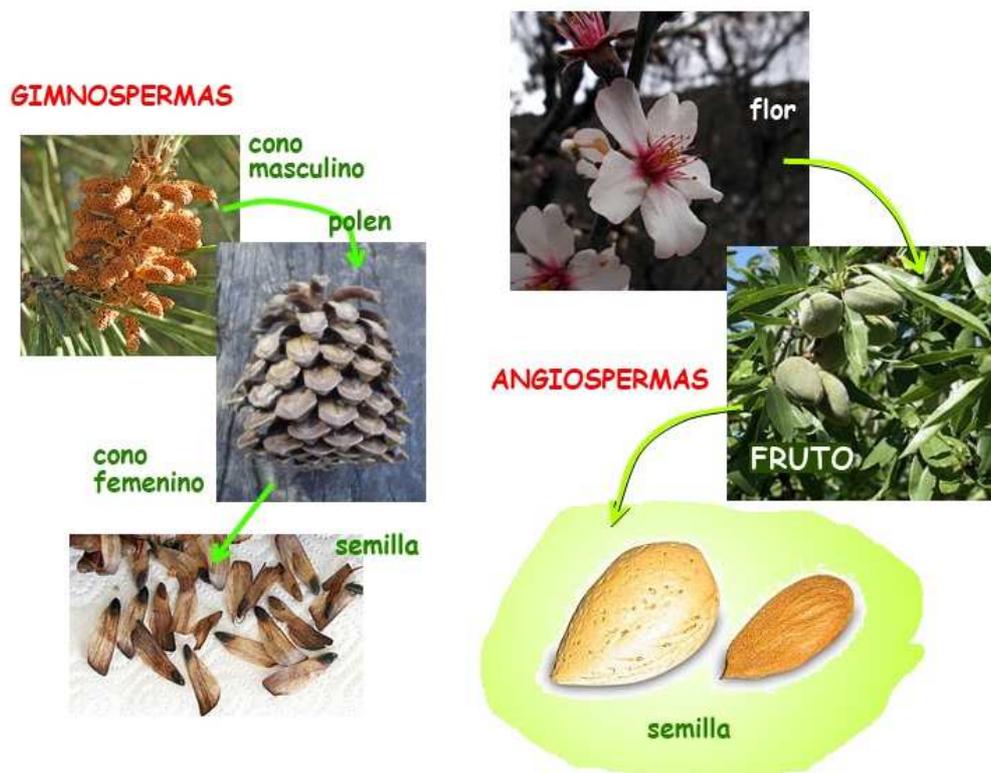


Evolución de la intensidad de ocurrencia según tipos de plantas durante el Cretácico de acuerdo al estudio mencionado en el siguiente párrafo (según estudio de Emiliano Peralta-Medina y Howard J. Falcon Lang)

Un estudio⁽⁸³⁾ realizado en 2012 en la Royal Holloway University de Londres llega a la conclusión de que al final del periodo representaban el 78% del total de todas las plantas. En este estudio se ha analizado una muestra de 2.238 fósiles de plantas datados en el periodo Cretácico. De todos ellos, 1.511 correspondían a especies que aún perviven en la actualidad.

Se posicionó a este último grupo según parámetros geográficos y cronológicos, lo que ha permitido determinar la posible evolución de las diversas especies a lo largo del tiempo. Las curvas de la figura siguiente son bastantes clarificadoras de lo que sucedió: un cambio radical desde una predominancia de las plantas gimnospermas (coníferas) a un dominio de las nuevas angiospermas.

Ante este éxito nos surge la pregunta sobre el porqué del mismo y el porqué del momento. Es evidente que su expansión no restó valor a la eficacia de la solución gimnosperma, que siguió prosperando como un recurso evolutivo viable. Tendremos que buscar el mayor éxito de las angiospermas, su diversidad y ubicuidad, en alguna de las diferencias con respecto a la antigua solución. Fisiológicamente las estrategias no varían entre ambas divisiones de plantas. El gran salto adelante se concretó en una diferente herramienta para la reproducción: **la flor**. Y lo que le acaeció a la flor con el paso del tiempo.



*Diferente protección de la semilla en gimnospermas y angiospermas
(Imágenes a partir de Wikimedia, GNU FDL 1.2, dominio público y CC
BY-SA 2.1 Spain)*

En un principio reunió en un mismo instrumento los gametofitos masculinos y femeninos, lo que simplificaría la fecundación. En segundo lugar, el desarrollo de la semilla quedó más protegido en el interior del

ovario y demás órganos florales, en contraste con el interior del cono femenino de las gimnospermas compuesto por escamas independientes y fácilmente accesibles. En tercer lugar, el desarrollo de la semilla se protegió con un grueso tejido que devendrá una fruta. A lo que se les añadieron las ventajas "operativas" resultantes de refinamientos en el proceso de polinización y de expansión de las semillas.

Vamos a intentar analizar ahora cómo y en qué momento surgieron en el panorama de los vegetales las angiospermas con sus flores.

Hay que reconocer que el tema no está muy claro. Esto debió producirse cuando la evolución de los genes estuviera preparada y cuando el medio ambiente en el más amplio de los sentidos fuera propicio para dejar actuar a esos genes. Se cree que evolucionaron a partir de algún grupo de gimnospermas como pudieron ser las gnetales -que presentan características a mitad de camino entre coníferas y angiospermas- o como pudo ser alguna cicadácea.

Los primeros fósiles de angiospermas datan de hace unos 140-130 millones de años y se tratan de pólenes encontrados en Marruecos e Israel. De unos pocos años después ya se encuentran restos de hojas, que eran pequeñas, con nervadura irregular y bordes lisos y sencillos, por lo que podrían ser de matorrales o arbustos.

El hábitat⁽⁸⁴⁾ de las plantas más ancestrales de este tipo correspondía a tipos de terrenos muy castigados por las escorrentías e inundaciones. Este tipo de plantas debieron verse favorecidas en estos suelos, puesto que al tener un ritmo de generación de semillas muy elevado, más que el de las coníferas, y además muy pequeñas, la probabilidad de dispersarse y prosperar tenía que ser considerable. En el yacimiento chino de Yixian se ha encontrado el fósil de lo que se considera la angiosperma más primitiva, el *Archaeofructus*, datado hace 125 millones de años.

No obstante estas dataciones, habrá que estar al tanto de los resultados de un estudio⁽⁸⁵⁾ realizado sobre pólenes fósiles encontrados en Suiza y en el mar de Barents, al sur de las islas Spitzbergen. En aquel momento cretácico estos lugares se situaban en latitudes tropicales. Los investigadores aseguran que estos fósiles presentan características similares a la de pólenes de angiospermas del Cretácico temprano. Estos fósiles ancestrales están datados en hace 245 millones de años, cien más que las evidencias fósiles de Yixian.



*Fósil del yacimiento de Xiyian correspondiente a *Archaeofructus lianoningensis* de 125 millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 2.5 Generic)*

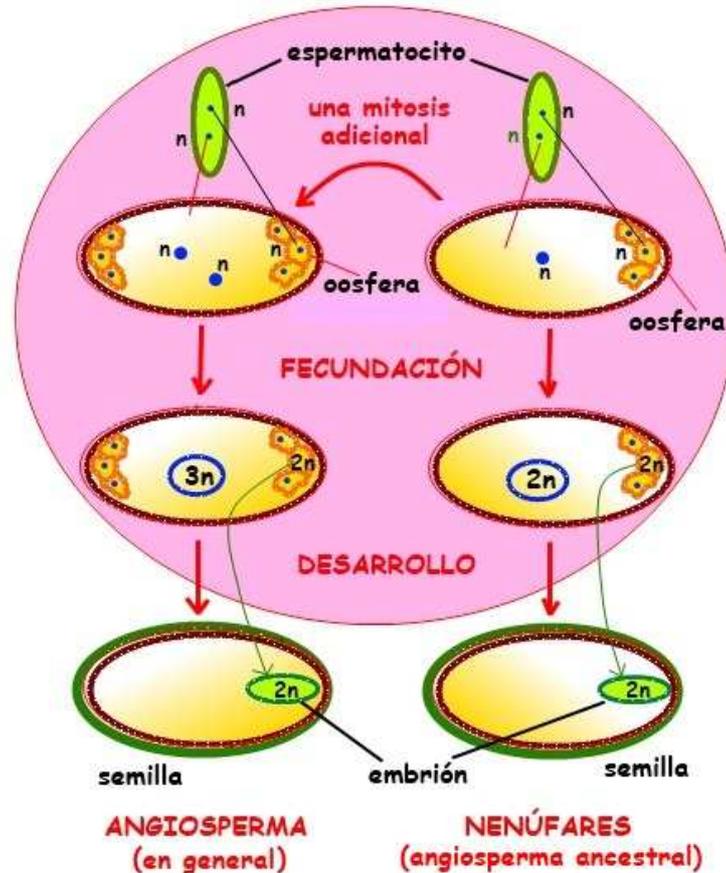
Las flores tuvieron que evolucionar a partir del software genético que ya gestionaba un órgano como es el cono -la piña- de las gimnospermas. A fin de cuentas, tenía que realizar una función semejante. Se supone que el inicio de estos aditamentos en las plantas fue el resultado de una defensa del material más precioso para su reproducción. La aparición de nuevas hojas o escamas protegiendo a los gametofitos suponía una ventaja evolutiva frente a la voracidad de los insaciables insectos. Ya en el mencionado fósil de *Archaeofructus* de la formación de Yixian se observan unas inflorescencias que presentan sus órganos masculinos y femeninos separados, estos últimos envueltos en algo que parecía una hoja doblada. En la misma formación se han encontrado también fósiles de flores con una estructura semejante al de las actuales angiospermas más basales, como puede ser el aguacate. En ellas las flores están más organizadas, aunque parecen estar formadas por lo más esencial: los pistilos u órganos femeninos, los estambres u órganos masculinos y los tépalos que a fin de cuentas son hojas modificadas que protegen a estambres y pistilos.

Las angiospermas más ancestrales exhiben una gran diversidad en cuanto al número, disposición y estructura de los órganos florales, como si se hubiera producido una múltiple exploración hacia diseños diferentes. Con el paso del tiempo, las nuevas angiospermas complican las protecciones y uniformizan la estructura de sus flores. Según un estudio⁽⁸⁶⁾ de la universidad de Florida, es posible que el cambio fuera motivado al

modificarse las cadenas de expresión secuencial de genes que ya eran operativas en las gimnospermas, de forma que se fue derivando con el tiempo su inicial influjo sobre los órganos centrales de la flor trasvasándose de una forma progresiva su acción hacia los órganos periféricos, los cuales se iban viendo potenciados.

De la flor surgieron los **frutos** y las **semillas**. Los frutos, como elementos de protección de las semillas así como actores principales en la función de su diseminación, como comentaremos más tarde. Las semillas, cumpliendo las mismas funciones de siempre. En los primeros momentos del periodo Cretácico la diversidad en formas de frutos y semillas era escasa. Más bien se trataban de frutos secos y sin unas características especiales que nos permitieran presumir que su dispersión fuera fácil. En aquel momento aún no era muy significativo el cambio climático que más tarde llevó al incremento de humedad que comentamos en los primeros párrafos de esta entrada. Por ello, las semillas fósiles corresponden a frutos secos, y son de pequeño tamaño. Se observa que aún sin variar en el tiempo este tipo de morfología, a medida que la pluviosidad se intensificaba en el planeta la diversidad de formas se va haciendo mayor, encontrándose en el registro fósil unas semillas más grandes y unos frutos más carnosos. Este tipo de frutos con pericarpios generosos aparecen durante el Cretácico superior casi en la frontera con el Cenozoico (65 millones de años).

No sólo evolucionó con el tiempo la morfología de los frutos de angiosperma, sino también su maquinaria embrionaria. Se sabe que el fruto y semilla que se producen tras la fecundación en una flor de este tipo de plantas es el resultado de un sorprendente *proceso de doble fertilización* consecuencia, como veremos en el siguiente párrafo, de una modificación durante el camino evolutivo de los gametos femeninos. El masculino, que queda contenido en el polen, tiene dos núcleos germinales, mientras que el gameto femenino situado en el gineceo de la flor está formado por siete células. Una de ellas tiene un doble núcleo, mientras que las otras seis, entre las cuales se encuentra la germinal oosfera, solamente tienen uno. Durante el proceso de fecundación uno de los dos núcleos del esperma fertiliza a la oosfera, iniciando así la vida del embrión. El segundo núcleo del esperma fecunda la célula de doble núcleo, formando una nueva con triple juego de cromosomas y que desarrollará el tejido alimenticio de la semilla. Las otras cinco células femeninas formarán los sacos protectores del embrión. La semilla así generada, conjuntamente con el tejido evolucionado del ovario de la flor, conformarán el fruto.



Evolución del proceso de fecundación del embrión en las plantas angiospermas, desde la fecundación simple de las más ancestrales a la fecundación doble de las posteriores.

Aunque no siempre fue así. El profesor Ned Friedman de la universidad de Harvard mantiene la teoría⁽⁸⁷⁾ de que la complejidad de este proceso ha sido el resultado evolutivo de una duplicación operativa en una angiosperma primitiva. Ha estudiado cómo es el proceso equivalente en nenúfares, plantas que filogenéticamente y cronológicamente se sitúan en la base de las angiospermas (se conocen fósiles de la familia datados hace unos 120 millones de años). Sorprendentemente, los nenúfares manejan la mitad de la estructura genética que la mayoría de sus familiares: el espermatozoides con dos núcleos germinales y el óvulo formado por cuatro células, todas ellas haploides. Es fácil colegir que la evolución hacia las formas de doble fecundación más modernas surgieron al producirse un error durante este proceso en las formas ancestrales: una mitosis adicional en el proceso de desarrollo del gameto femenino duplicó el escenario. Al observar la morfología de los gametos participantes, tal como se esquematiza en la figura anterior, en ambas modalidades se ve que realmente esto es lo que sucede.

La evolución hacia la doble fecundación en las modernas angiospermas representó una oportunidad ventajosa en el permanente escenario de la selección natural, y desembocó a la postre en una nueva clase de plantas basada en una máquina reproductiva súper-eficiente. Pero éste no fue el único éxito de las plantas angiospermas. La evolución les llevó también a dominar nuevas formas de diseminar su simiente.

Una de ellas es la polinización realizada mediante la acción de los insectos. Su gran ventaja es que permite un intercambio genético entre individuos muy lejanos y en poblaciones muy pequeñas. Esta modalidad es la que más éxito ha conseguido, ya que el 90% de las angiospermas actuales disfrutan de polinización realizada por animales, ya sean mamíferos, aves o insectos. La mayoría de los botánicos opinan que la evolución ha primado esta modalidad, ya que ofrece una gran ventaja en contraste con la polinización por efecto del viento: la precisión. Las evidencias permiten asegurar que se produjo un proceso de coevolución con esos animales. Efectivamente, los estudios filogenéticos y paleontológicos indican que hubo una estrecha relación entre polinizadores y plantas de muy diversos tipos y sin parentesco directo entre ellas. Ya sabemos desde el capítulo 33 que dedicamos al periodo Carbonífero, que los insectos estaban allí desde hacía muchos millones de años. Los primitivos coleópteros, los dípteros, los himenópteros... siguieron prosperando a lo largo del Triásico y Jurásico con un gran esplendor de diversificación justo en el momento en que nos encontramos. Inicialmente serían hematófagos o fitófagos. La presión de una sobreabundancia de población y las estrategias de defensa que adoptaban las plantas frente a los ataques de los insectos hizo que estos "descubrieran" el potencial proteínico de pólenes y semillas. El inicio de la polinización por animales pudo haberse producido en tres linajes basales de plantas sin ninguna conexión entre ellas, incluso ya en gimnospermas. Parece claro el papel relevante de los coleópteros en la diversificación de las primeras plantas con flores -quizás fueron los primeros en polinizarlas-, aunque también los dípteros y otros grupos de insectos debieron participar en la tarea ¿Qué es lo que atrajo a los coleópteros hacia aquellas flores primitivas? Además de que el polen tuviera un gran atractivo proteínico y energético para los pequeños insectos, se supone que pudiera ser que las flores les ofrecían una especie de cobijo templado gracias al calor residual del metabolismo vegetal.

De esta forma, de lo que en principio fue una amenaza para las plantas, la evolución supo sacar una impagable oportunidad. De tal forma que, con el paso del tiempo, las morfologías polinizador/polinizado coevolucionaron a la par y se hicieron tan dependientes que hoy en día es fácil observar que

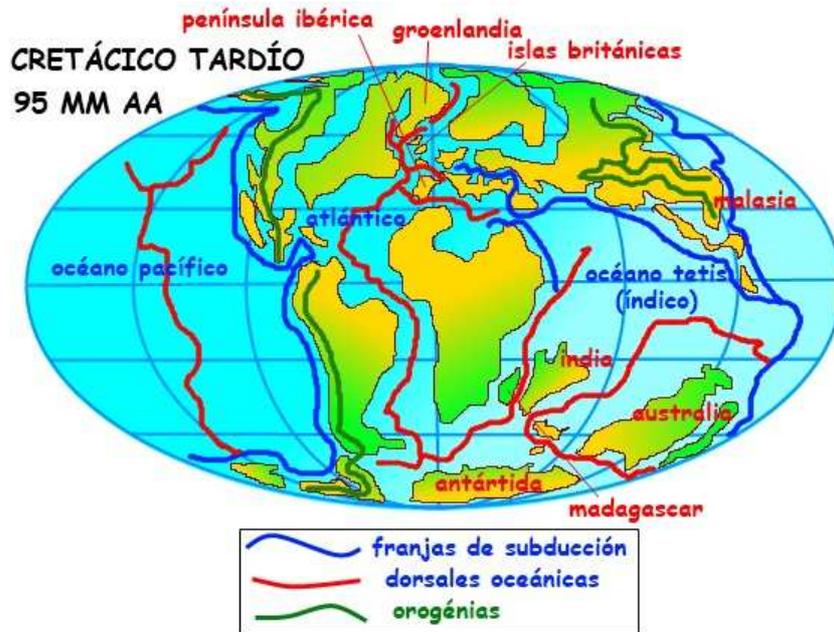
para un determinado tipo de planta existe un determinado tipo de polinizador en una perfecta relación de mutualismo.

Y no se reduce la historia al caso de los pólenes. El fruto de las angiospermas exige para su producción un gasto energético para algo que en principio podríamos pensar que no le añade ninguna ventaja reproductiva. Pero realmente no es así. Sus formas, colores y valores nutritivos eran un reclamo para cualquier tipo de animal, que encontraban en ellos un agradable almacén de energía en forma de azúcares. Los animales frugívoros, además de comer la carne del fruto ingerían las semillas, que luego eran diseminadas con sus deposiciones. Y así como hubo y hay coevolución entre animales polinizadores y flores, parece que no existe lo mismo entre frugívoros y frutos. No obstante, una vez que se cruzó la frontera Cretácico/Terciario se observa una evolución relativamente rápida de una gran cantidad de tipos y tamaños de frutos, lo que algunos autores achacan al rápido desarrollo de las aves y de los mamíferos, los principales encargados de la dispersión de las semillas y frutos en la actualidad.

A finales del Cretácico el porte de las angiospermas se había hecho mayor, y ya se reconocen algunas de las plantas actuales como hayas, higueras, abedules, acebos, magnolias, robles, palmeras, sicomoros, nogales y sauces, especies que en la actualidad pueblan nichos muy diferentes. Sus bosques no sólo proporcionaron hábitats que más tarde dieron apoyo a la diversificación de anfibios, hormigas, mamíferos placentarios o helechos, sino que también fueron el origen de un beneficio para el *Homo* tecnificado. La exuberancia de la vegetación de angiospermas durante el Cretácico queda manifiesta hoy en día en los extensos depósitos de carbón que se encuentran en latitudes superiores a los 50°, tanto en el norte como en el sur. Los grandes yacimientos que se explotan en la actualidad a cielo abierto en el oeste de Estados Unidos se formaron en aquellos momentos.

Y hasta aquí el análisis de la evolución de estas maravillosas plantas que ponen a disposición de la humanidad los principales almacenes de alimentos que tenemos: los graneros de cereales, los llamados frutos secos y las huertas y frutales. Como para quitarse el sombrero al recordar las pequeñas historias que se confabularon para hacer posible tamaño regalo. En el siguiente capítulo iniciaremos la revisión de la biota animal del Cretácico, dejando todo lo relacionado con los mamíferos para uno posterior.

43. La biota animal en el Cretácico



El anterior capítulo nos introdujo al periodo Cretácico. Sabíamos algo de él, ya que en uno anterior habíamos hablado de la conquista del aire por parte de los dinosaurios, suceso que aconteció en pleno Cretácico. Ahora vamos a continuar para iniciarnos en el mundo de la biota animal, cosa que completaremos con una breve reseña de todo lo que se mueve... a excepción de los mamíferos, a los que dejaremos para estudiarlos más en detalle en el capítulo 44 siguiente.



Comenzaremos en el mar.

Los microorganismos experimentaron grandes cambios a partir del Cretácico medio. Con seguridad, por las altas temperaturas de las aguas y,

posiblemente, también motivado por los cambios en la química de los mares.

Por un lado, las aguas superficiales debían contener un *porcentaje elevado de nutrientes*, ya fuera por los arrastres terrestres producidos por las abundantes lluvias o como consecuencia del anegamiento de viejas tierras al subir el nivel de los mares. O también por el reflotamiento que se produjo de sedimentos marinos. En el capítulo anterior ya comentamos que en los mares cada vez más cálidos del Cretácico, se iba incrementando la concentración de sales en las aguas superficiales. Su mayor densidad hacía que descendieran a cotas inferiores, a pesar de su elevada temperatura. Como consecuencia de ello se producían afloramientos de agua “fría” de los fondos, lo que reflotaba sedimentos fértiles de las plataformas costeras que se habían ido acumulando tras millones de años de arrastres. Por otro lado, en las nuevas cortezas continentales se liberaba cada vez más hierro, que se disolvía en las aguas oceánicas. El hierro es un nutriente esencial para las algas, por lo que se considera que este fenómeno pudo ser también decisivo en el auge de los microorganismos marinos.

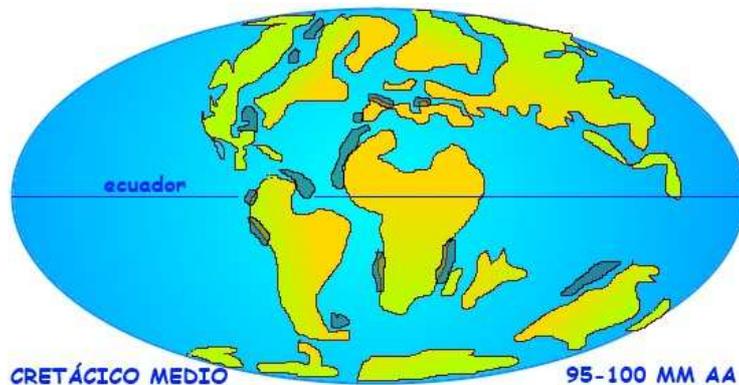
Todo ello llevaría a un *descontrolado crecimiento de la actividad biológica* en las aguas superficiales, lo que unido a las elevadas concentraciones de nutrientes tuvo como consecuencia un importante agotamiento del oxígeno. En aquellos momentos la *anoxia* - baja presencia de oxígeno- se daba en extensas zonas oceánicas, y no sólo se debía a causas orgánicas sino también al influjo del clima.

Las *condiciones de temperatura de las aguas oceánicas* actuaban en favor de la anoxia. En la recalentada agua de la superficie se diluiría mal el oxígeno atmosférico por lo que difícilmente podría difundirse hasta las aguas más profundas. A ello se le unía el hecho ya comentado de que, en los templados trópicos, las aguas incrementaban la concentración de sal por la sobre evaporación, lo que favorecería el hundimiento de esas aguas pobres en oxígeno, extendiéndose la anoxia de la superficie a los fondos. Podríamos pensar que en una época de intensa pluviometría como era aquella, en las extensas zonas marinas donde las lluvias caían abundantes, frías y con oxígeno, se invertiría la situación anterior. Pero no era así, ya que el principal efecto que inducían las aguas frías y dulces de la lluvia se concretaba en la dilución de la salinidad en superficie. A pesar de que por convección las aguas enfriadas de la superficie tenderían a bajar al fondo más cálido, parece ser que este fenómeno era sobrepasado negativamente por la disminución de la densidad. Todo ello favorecía la estratificación de las primeras capas de agua, por lo que estas permanecerían estáticas y sin

producirse hundimiento de volúmenes que trasladaran oxígeno, aunque fuera escaso, a los niveles inferiores.

Se sabe que hace 94 millones de años tuvo lugar el momento en que la anoxia fue mayor. La precariedad del oxígeno en el agua provocó una gran mortandad de bacterias aeróbicas y por el contrario una proliferación⁽⁸⁸⁾ de un tipo de arqueas menos termófilas que la mayoría de la población existente, un tipo de diminuto plancton marino, unicelular, con un metabolismo que no se apoyaba en el oxígeno molecular y que conseguía la energía a partir de la de los enlaces químicos de ciertos compuestos inorgánicos.

La muerte de las bacterias aeróbicas tuvo como consecuencia una intensa deposición y enterramiento de materia orgánica sin descomponer, que en muchas regiones, como los mares de aguas poco profundas, formó grandes depósitos de calizas negras con un 80% de materia orgánica, que es la que da el color oscuro. Hasta el 80% de los compuestos orgánicos detectables en estos esquistos negros parecen haber sido productos de la degradación de los lípidos estructurales de las membranas de estas arqueas. También algunos de los compuestos orgánicos encontrados en estas calizas corresponden a biomarcadores de coccolitóforos, un tipo de algas muy especiales, como veremos a continuación.



Regiones de sedimentación de calizas negras durante el Cretácico medio

Un inicio distinto, pero con un final parecido, es el que tuvo la actividad biológica en la franja específica de la superficie de los océanos. En un ambiente de aguas calientes, con toda la luz solar y una completa disponibilidad del oxígeno atmosférico, proliferó el plancton cuyos individuos fueron evolucionando hacia formas y estructuras semejantes a las de las morfologías modernas. Las algas diatomeas, que generalmente eran del tipo silíceo más que calcáreo, y los dinoflagelados, unos protistas

normalmente unicelulares con flagelo, experimentaron una tremenda expansión poblacional.

En los mares comprendidos en la franja tropical norte, Tetis y parte del Atlántico Este, el rebotante microplancton se convirtió en petróleo y areniscas bituminosas a mediados del Cretácico, durante el intervalo comprendido entre hace 120 y 75 millones de años. El 60% de las reservas conocidas de petróleo se generaron en esta época: el Golfo Pérsico, norte de África, Golfo de México y Venezuela.

Relacionado con todo lo anterior está el hecho de la proliferación de microorganismos mineralizados durante todo este periodo. Casi a inicios del mismo se observa en la biomasa marina un marcado incremento de especímenes con esqueletos mineralizados. Es un fenómeno que recuerda lo que pasó durante los primeros años del Fanerozoico, durante la explosión cámbrica. En los inicios de aquel momento la respuesta biológica llevó a la evolución de los “pequeños fósiles con concha” (*small shelly fossils*). Ahora en el Cretácico el episodio se concreta con la aparición de nuevos foraminíferos (“*los portadores de agujeros*” por donde asomaban pseudópodos que utilizaban para capturar alimento y moverse), algas diatomeas y cocolitóforos, que con este raro nombre no dejan de ser otro tipo de algas que llevaban unas escamas de carbonato cálcico, los “cocolitos”.



Pequeños microorganismos del Cretácico que desarrollaron una mineralización (imágenes de Wikimedia, dominio público, CC BY-SA 2.5 Generic y CC BY-SA 3.0 Netherlands)

Pudiera ser que este incremento de microorganismos mineralizados fuera motivado por algo que ya ocurrió también en el Cámbrico. Las rocas que recién formaban la corteza oceánica presentaban una tendencia a la absorción del magnesio en contraposición a la del calcio, con la consecuencia de que más iones de este último quedarían libres disueltos en el agua. En aquel momento Pangea se estaba acabando de abrir siguiendo múltiples dorsales submarinas, en donde se generaba nueva corteza como consecuencia de la intensa exudación de magma que se vertía a través de ellas. Con seguridad ello llevó a un incremento de la concentración del calcio en las aguas a expensas de una disminución de la del magnesio. La calcita resultante de la cristalización de este extra de iones calcio es un mineral muy estable, y por tanto con larga vida en el escaparate para el que lo quiera aprovechar. La selección natural hizo el resto, ya que el hecho de desarrollar un esqueleto mineralizado prestaba al individuo que lo intentaba una serie de ventajas que no eran exclusivamente las relacionadas con la defensa y protección. También se favorecían las relaciones simbióticas al poder entrelazarse los exoesqueletos calcáreos mediante sus agujas, poros y desigualdades, a la par que por las mismas razones se disponían en ellos de un almacenamiento supletorio de materiales útiles. Y aún más ya que servía para controlar la flotabilidad al poder almacenar más o menos aire en sus porosidades. Su variada composición química les suministraba una adicional reserva intracelular de iones como podía ser el del litio, muy activo en los procesos metabólicos.



Acantilados cretácicos de Dover (Wikimedia, CC BY-SA 2.0 Generic)

La superabundancia de estos microorganismos, unida a los altos niveles de los mares que dejaban grandes extensiones de aguas relativamente poco profundas a finales del Cretácico, favoreció la sedimentación de los restos minerales de cocolitóforos y compañía. El resultado han sido los gruesos depósitos de calizas marinas y de creta, una arcilla blanca de tipo calizo

que se usa para fabricar la tiza para escribir en las pizarras escolares, y que dio nombre al periodo, como ya se comentó en el capítulo anterior. La distribución de estos depósitos es muy extensa y variada. En el noroeste europeo se formaron los famosos acantilados blancos de Dover, en las costas meridionales de Inglaterra, así como similares formaciones en la costa francesa de Normadía.

Por debajo de este rico mundo del plancton había otro biotopo lleno de vida. En este entorno se va a culminar lo que venía arrastrándose desde el vacío que provocó la crisis del Pérmico-Triásico y que se conoce como la “*Revolución marina del Mesozoico*” ¿qué subyace en tal revolución?

En el mar se van a cambiar las morfologías y hábitos vitales de los animales de la fauna evolutiva del Paleozoico -estructura braquiópoda-, que a su vez había sustituido a la del Cámbrico -estructura trilobite-, dando lugar a lo que se conoce como la fauna evolutiva moderna -estructura molusco-. Y todo debido a que el nuevo escenario ambiental, que prácticamente había partido de cero tras la mencionada crisis, provocó una carrera armamentística entre los posibles predados que iban incrementando sus defensas minerales y los posibles predadores que cada vez disponían de herramientas más especializadas y potentes para la rotura de conchas. Se observa en este periodo, el Cretácico, un incremento desmesurado de ese tipo de predadores, los *durófagos*, abarcando todo el abanico animal marino desde invertebrados hasta vertebrados e incluso aves. Eso motivó también unas modificaciones en cierta fauna submarina que se concretaron en la desaparición o la emigración de las especies más desprotegidas, braquiópodos o crinoideos, hacia zonas más profundas.

Mientras los braquiópodos entraban en franca regresión, los ammonoideos cambiaban su aspecto hacia formas extrañas y se veían acompañados por los belemnites, otro tipo de molusco cefalópodo pero con una concha interna. Ambas familias duraron lo que duró este periodo, es decir, desaparecieron con la extinción masiva de la frontera cretácico/terciario.

Aparecen nuevos moluscos gasterópodos que se diferencian de sus antepasados porque son ferozmente carnívoros: perforaban conchas y succionaban la carne del pobre inquilino, y también tenían la capacidad de paralizar a sus presas con tóxicos, lo que les permitía “tragarse” pequeños peces.

Pero no eran los únicos predadores, ya que las poblaciones de crustáceos en el Cretácico estaban constituidas por verdaderos cangrejos y langostas

que abrían las conchas de los moluscos forzándolas con sus pinzas. Sus presas bivalvos “tomaron” serias decisiones para escapar de la quema: para escapar, o bien se enterraban cada vez más profundamente en las arenas, o bien desarrollaron conchas muy macizas o espinas para disuadirlos. ¡Algunos poseían valvas de casi 1,8 metros de longitud!

En los arrecifes había una seria competición. Los principales constructores de estas estructuras no eran los corales, que ya presentaban morfologías modernas: la mayoría de los arrecifes del Cretácico fueron formados por grandes moluscos bivalvos *Hippuritoida* que tenían una concha con forma de cono de hasta un metro de altura, con la que solían estar sujetos al sustrato, y la otra concha libre que hacía de tapa. Vivían en aguas someras agrupándose numerosos individuos, entre los que se consolidaban los sedimentos reforzando las colonias. Posiblemente esta cooperación fuera el resultado de una estrategia defensiva pasiva.



Arrecife fósil del Cretácico formado por moluscos Hippuritoida. En la parte inferior el fósil de uno de estos animales (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Y entre el plancton flotante y los arrecifes y arenas del fondo, en las aguas intermedias comenzaron a ser comunes las rayas, los tiburones y los teleósteos, todos ellos de gran tamaño, que sustituyeron a los regresivos ictiosaurios y plesiosaurios. Realmente parece que en el mar se estaba reproduciendo el gigantismo que se observaba en tierra. Grandes tortugas

de tres metros de longitud, unos teleósteos de hasta cuatro metros, los plesiosaurios con doce metros, los nuevos lagartos fluviales mosasauridos, que alcanzaron longitudes de 17 metros, ...



Esqueleto de Mosasaurus hoffmannii ;Bonita boca! (Wikimedia, dominio público)

Nos vamos a tierra.

Iniciaremos el paseo de la mano de los **insectos**, con un apunte sobre los *lepidópteros*, mariposas y polillas, cuyo esplendor como animales succionadores dotados de una probóscide se manifiesta en esta época al calor del desarrollo de las angiospermas y sus flores. Sus raíces son más antiguas ya que se estima que este orden de insectos pudo surgir a finales del Pérmico o inicios del Triásico, quizás como especies relacionadas con las viejas “*moscas escorpión*“, de las que hablábamos en el capítulo del Jurásico. Los primeros fósiles conocidos de los lepidópteros son de hace entre 130 y 110 millones de años y corresponden⁽⁸⁹⁾ a un individuo de la especie *Zygaena turolensis*.

De inicios del Cretácico son también los primeros insectos *parásitos de los vertebrados de sangre caliente*, antepasados de pulgas y piojos. Los fósiles más antiguos de estos animales son los de *Tarwinia australis*, con una antigüedad entre 122 y 112 millones de años. Aunque *Tarwinia* no

tenía aún desarrollados los músculos de las patas que hacen de las pulgas actuales unas saltadoras olímpicas. Esta habilidad llegaría más tarde.

No nos podemos olvidar de los Himenópteros, cuyo esplendor se dio durante el Cretácico. Las abejas y las hormigas emergieron a mediados del periodo coincidiendo con la aparición de las plantas con flores. Como ya sabíamos por lo dicho en el capítulo anterior, no nos extraña el comprobar cómo la aparición y la divergencia de las abejas, que se produjo hace unos 110 millones de años durante el Cretácico, haya coincidido con una de las radiaciones más notables dentro de las plantas, la de las angiospermas, acontecida en la misma época. Evidencia de un completo proceso de evolución armonizada entre insectos y plantas.



Fósil conservado en ámbar de la abeja Melittosphex burmensis (Science⁽⁹⁰⁾, 27 octubre 2006)

El fósil más antiguo de abeja que se conoce⁽⁹⁰⁾ data de mediados del Cretácico, hace unos 100 millones de años, y corresponde a una *Melittosphex burmensis* que murió en una gota de ámbar. Se encontró en Birmania. En sus patas conserva dos caracteres ancestrales de transición entre otros grupos de himenópteros semejantes a las avispas y las más modernas abejas.

El *comportamiento social* en los insectos, con un complejo sistema de castas que realizan trabajos especializados, apareció varias veces, primero en las hormigas y avispas a mediados del Cretácico y después en las abejas a finales de este período. En las rocas calizas del monte Montsec, en la provincia española de Lérida, se han encontrado las termitas más antiguas conocidas. Allí también se ha encontrado⁽⁹¹⁾ el fósil de una termita en ámbar que claramente era una obrera y por lo tanto perteneciente a un grupo social, lo que representa el primer registro fósil de este tipo. Este yacimiento está datado en el Cretácico inferior.

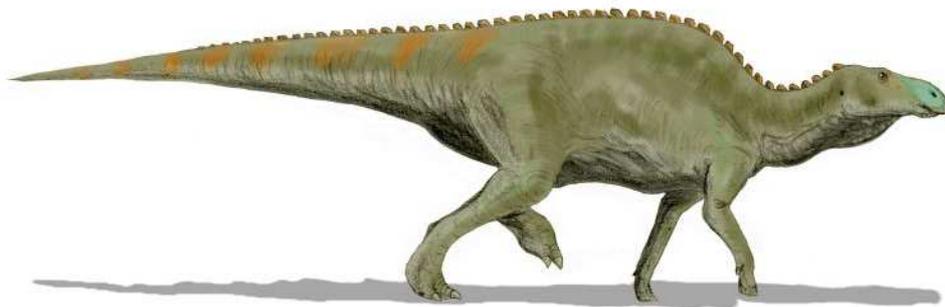
Hay una gran ventaja para estos insectos -termitas, hormigas y abejas- en el hecho de haber formado sociedades con organizaciones de alto nivel de complejidad. Gracias a estas estructuras sociales han llegado a la optimización de la reproducción, la defensa colectiva y la obtención y procesado del alimento que les ha llevado a un puesto clave en el dominio ecológico de nuestro planeta. Baste para calibrar este éxito el saber que el peso de todas las hormigas en el momento actual puede ser equivalente al peso de todos los humanos. El significado de esta conquista es tal que para el prestigioso genetista John Maynard Smith el paso de individuos solitarios a colonias es una de las ocho transiciones esenciales de la evolución. Ya comentamos en el capítulo 23 las teorías del biólogo evolutivo británico William D. Hamilton, con las que explica el por qué del comportamiento social de algunos insectos y que se resume en que es un sistema muy eficaz para transmitir el acervo genético de estas especies. Para quien esté interesado en este tema recomiendo la lectura del artículo⁽⁹²⁾ del biólogo Ignacio Fernández Escudero “*Evolución de la eusociabilidad en los insectos*”.

Pero no todo fueron buenas noticias para los insectos del Cretácico. Recordemos que en estos momentos hacía su aparición el *Archaeopteryx* y sus amigos voladores. Su presencia en el rol de actores de la biosfera no fue una noticia agradable para todos. Unos pocos quedaron afectados de una manera muy negativa. Entre ellos destacamos a los insectos. Suponemos, y tenemos explicaciones para ello, que su tamaño iba parejo a la evolución de la concentración atmosférica del oxígeno. En el Jurásico sabemos también que este gas recuperó una senda alcista -que continuó en el Cretácico-, por lo que podríamos pensar que en este momento los insectos deberían haber vuelto a sus épocas de gigantismo glorioso. Pero no fue así. El registro fósil demuestra que por lo general disminuyeron de tamaño. Y esto fue así por la nueva destreza que apareció con los reptiles voladores, tipo pterosaurio, o con las nuevas aves. Por razón de competencia dentro de los mismos nichos o por razón de

depredación, la selección natural hizo que los insectos voladores disminuyeran su tamaño para mejorar la maniobrabilidad del vuelo y por tanto abrir espacios a nuevas oportunidades, a pesar del impulso que recibían del oxígeno. Algo parecido sucedería más tarde durante los primeros millones de años de la siguiente era, el Cenozoico, el momento en que se produce la gran diversificación de las aves modernas y la aparición de los primeros mamíferos voladores, los murciélagos, que es cuando se constata en el registro fósil la desaparición de los insectos planeadores.

Y ahora dejemos los pequeños insectos y visitemos a los mayores del patio. En estos años los **dinosaurios** consolidan su dominio, siendo el Cretácico el periodo en el que alcanzaron mayor auge y desarrollo. En aquellos momentos coincidían una gran cantidad de especies con modos de vida y morfologías muy dispares, que han dado pie a kilómetros de publicaciones, por lo que sólo daremos una breve pincelada particular de cada uno de sus subgrupos de los que ya hablamos profundamente en el capítulo del Jurásico.

En los paisajes norteamericanos abundaban los ornitópodos, un infraorden de los ornitisquios, los “*cadera de lagarto*”. Los ornitópodos o “*pies de ave*” tenían un pie con tres dedos. Eran herbívoros y desarrollaron un sistema masticatorio y digestivo muy evolucionado, parejo al de las actuales vacas. Inicialmente eran bípedos, con una larga y fuerte cola que les servía de balancín durante la marcha, pero con el tiempo adoptaron el desplazarse a cuatro patas, posiblemente porque les resultaba más fácil el comer la vegetación del suelo.



El Edmontosaurus un ornitópodo del Cretácico (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

En el sur, en Gondwana, era frecuente el *Titanosaurus* que era un dinosaurio de la infraorden saurópoda de los saurisquios, los ya conocidos “*cadera de ave*”. Era un cuadrúpedo herbívoro de cuello muy largo.

Debemos hacer también una pequeña mención a la otra infraorden saurísquida, la de los terópodos -los “*pies de bestia*”-, todos ellos carnívoros, para no olvidarnos de uno de los dinosaurios más afamados, el *Tirannosaurus rex*. Con sus enormes medidas, trece metros de longitud, cinco de alto y cinco toneladas de peso, era uno de los depredadores más sanguinarios de finales del Cretácico.

Debemos dejar ya a los dinosaurios, lo que hacemos con un cierto sentimiento de nostalgia, pues estos tremendos e importantes animales que impusieron su ley no sólo por la fuerza, sino por su capacidad de adaptación e inteligencia, sobrevivieron con éxito en un variado muestrario de hábitats y con un variado abanico de costumbres y formas de vida. Despidámonos de ellos dejando volar de nuevo la imaginación sobre un ¿por qué no? posible paisaje del Cretácico, como el de la recreación de más abajo.

Un día tranquilo junto a una de las innumerables llanuras que habían quedado anegadas por la subida de las aguas durante el Cretácico. El cielo lleno de cirros aseguraba un día primaveral. Un bosque de coníferas llega junto a la orilla. A los pies de éstas unos helechos herbáceos exuberantes por la continua humedad en el subsuelo donde enraízan.



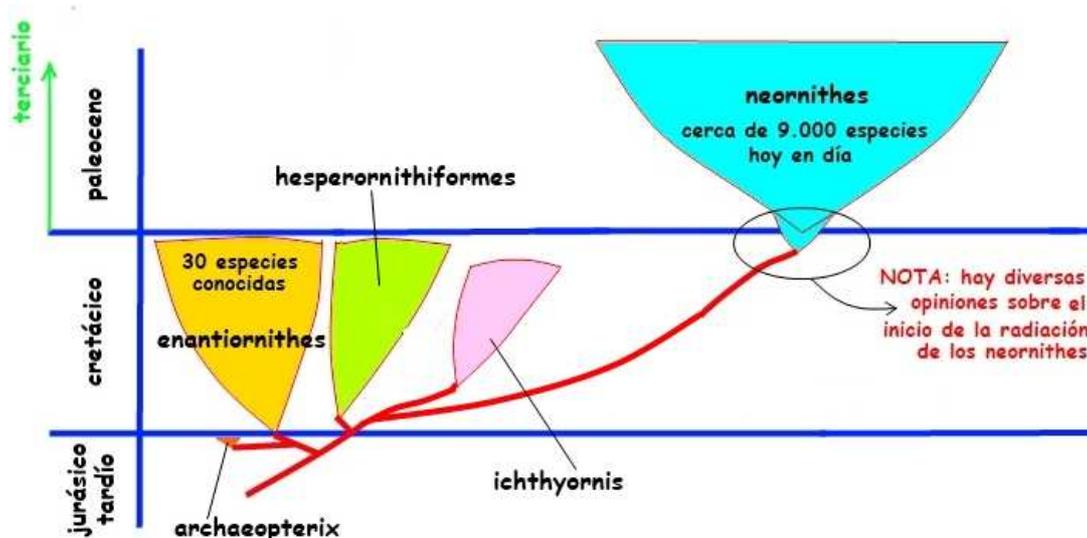
Representación artística de una escena cretácica (Autor: José Miguel Pino)

Por la orilla merodea un “garra pesada”, un *Baryonix*, que a pesar de su apariencia fiera y depredadora se alimenta sólo de pescado. Su paso no ha dejado indiferentes a los que estaban aún cargando las pilas bajo el débil sol de la mañana. Pero no parecen asustados, sólo curiosos ante la aparición del dinosaurio. La tortuga en último término escapará escondida entre las matas de los equisetos que crecen inhiestos, a sus espaldas. Bien pudiera ser una *Salasemys pulcherrima* o “tortuga preciosa de Salas” de los Infantes, Burgos, en donde se encontraron fósiles de sus “tataramuchosnietos”. Un pequeño cocodrilo *Goniopholis*, ya que sus mayores llegaban a los cuatro metros, apenas se inmuta en su descanso, varado en las aguas cálidas de la orilla, buena costumbre que continuará en la historia de la familia como hacen hoy en día sus primos del Nilo. En el centro de la imagen, en un segundo plano, un grupo de *iguanodontes* se dirige a abreviar tras haber alimentado su cuerpo de tres toneladas con abundante follaje. Más al fondo un viejo y cansino *Rebbachisaurus* cruza el brazo de agua, parece que con morriña de su patria africana, de donde la licencia del dibujante, o del narrador, le ha sacado para ponerle sobre un paisaje castellano. En el cielo, una pareja de pterosaurios *Ornithocheirus* vuelan con dificultad. Debían haber recogido una ráfaga del embate, ya que eran bastante torpes y no les resultaba fácil levantar del suelo. Ahora planeaban desmañados con la urgencia de encontrar un lugar adecuado para posarse. No son los únicos en el cielo, que comparten con un *Ichthyornis*, el “ave pez”, muy parecido a una moderna gaviota. En primer plano aparece la sofisticación del Cretácico: las primeras flores primaverales de una angiosperma.

Por desgracia hay que despedirse de esta variada comunidad, sobre todo de los dinosaurios. Les quedaba poca historia que vivir, ya que la extinción de finales del periodo se llevó por delante a la mayoría para no aparecer nunca más. Sólo quedará el recuerdo de algunos de ellos en las aves.

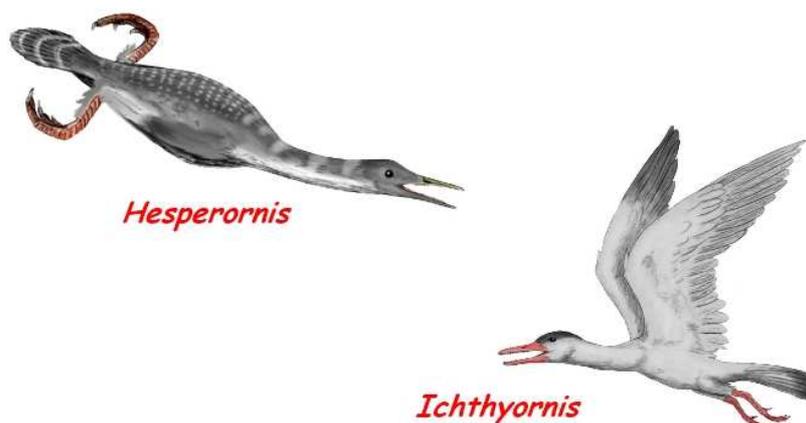
Pero no adelantemos las malas noticias y hablemos ahora de estas últimas, las vitales aves impulsadas por un volcánico metabolismo de sangre caliente. Se diversificaron en un amplio abanico de formas a lo largo del Cretácico. Muchas mantuvieron las características primitivas, como el *Archaeopteryx*, con su larga cola ósea, garras y dientes y, evidentemente, alas. Los dientes se fueron perdiendo progresivamente así como se fue acortando la cola.

Pero pronto se fueron cubriendo las grandes etapas que llevarían a las aves hasta las formas modernas.



Esquema de evolución de la clase Aves. La anchura de las áreas da una idea aproximada de la magnitud de la diversidad en las subclases.

El primer linaje grande y diverso de aves de cola corta que evolucionó fue *Enantiornithes*, que significa “aves opuestas”, llamado así porque la construcción de sus huesos del hombro estaba invertida respecto a la de las aves modernas. Ocupó un amplio espectro de nichos ecológicos donde vivía, desde los limos hasta las arenas, sondeando en busca de pequeños animales, restos vegetales o incluso al acecho de peces, hasta las formas arborícolas y comedoras de semillas.



Representación artística de Hesperornis y de Ichthyornis, aves del Cretácico ya extintas (Wikimedia, GNU FDL 1.2 y CC BY 3.0)

Más modernos en el camino evolutivo fueron los miembros de un orden de aves marinas, *Hesperornithiformes*, que se adaptaron tan bien a la pesca en ambientes marinos que perdieron la capacidad de volar y se hicieron

básicamente acuáticos. Sus patas ocuparon una posición muy posterior de forma que les permitía un poderoso nado y buceo, aunque en tierra debían ser muy torpes. Allí se movían deslizándose, por lo que probablemente pasaban poco tiempo fuera del agua excepto para anidar. Algo semejante a los pingüinos actuales.

Por último tenemos a las *Ichthyornis* de las que conocemos numerosos especímenes y que desaparecieron hace unos 80 millones de años. Se les considera aves acuáticas del Cretácico que ocuparon nichos parecidos al de habitación de los actuales petreles o gaviotas. La estructura de sus alas y esternón son de apariencia muy actual por lo que se les debe suponer una gran habilidad voladora, lo que las situaría muy próximas a las aves modernas.

Tras ellas nos encontramos con las *Neornithes* que son ya las primeras aves modernas antecesoras de todas las actuales. Antes del fatídico episodio que veremos en el capítulo siguiente, y que fija la frontera geológica entre el Mesozoico y el nuevo Cenozoico, ya se habían desgajado de la rama las gallináceas y las anseriformes. De estos últimos se conoce un fósil encontrado en la península Antártica de *Vegavis iaai* que vivió hace unos 65 millones de años.

Procede ya ir cerrando con el último párrafo de este variado capítulo, en el que nos hemos encontrado con las tremendas vicisitudes sufridas por los microorganismos planctónicos en un momento en que los gasterópodos fueron casi tan feroces como los gigantes marinos que atravesaban las aguas. Luego hemos visitado a los insectos cuando aparecieron las abejas que amablemente nos han dado pie para introducir las costumbres sociales de algunos de estos ubicuos animales. Tras un breve repaso a los tres órdenes base de los dinosaurios cretácicos, hemos acabado descendiendo los también tres últimos escalones que siguieron las aves antes de convertirse en las más de 10.000 especies de hoy en día. Les quedaba pasar la frontera del terror cósmico. Pero esto último será objeto de un capítulo posterior. Antes, en el siguiente, aún debemos completar el viaje por la biota del Cretácico hablando de los mamíferos.

44. Los mamíferos del Cretácico

En los dos últimos capítulos nos hemos movido en los dominios del periodo Cretácico. Su geología y clima, las plantas con la nueva maravilla de las angiospermas y sus flores y frutos, para por último iniciar el conocimiento de la biota animal. Nos quedamos a las puertas de la casa de los mamíferos. En este momento retomamos la andadura acompañando a estos animales, por aquellos días pequeños, ladinos y oportunistas. La competencia obligaba a aguzar el ingenio. Seguimos entre hace 145 y 65 millones de años. La función va a empezar.

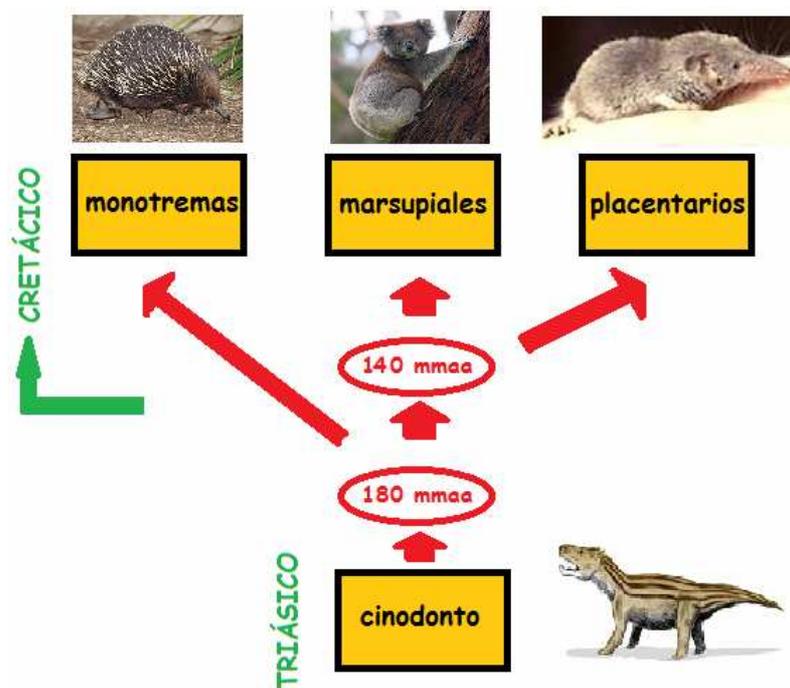
¡Ojo!

Algo se mueve con disimulo en un rincón de la escena, algo oculto en el paisaje y en nuestro subconsciente. Algo que faltaba para completar el rompecabezas del Cretácico. Allí seguían inmersos en la oscuridad nocturna de su vida social y familiar, oído vigilante, olfato alerta, ojos escrutando los grises de las sombras, el gatillo metabólico a punto de dispararse: no, no nos hemos olvidado de los mamíferos.

No habían cambiado casi nada desde el Jurásico. Eso sí, habían evolucionado y ya era habitual el observar individuos de alguna de sus tres grandes familias actuales: los *monotremas*, los *marsupiales* y los *placentarios*. No nos olvidemos que por las tierras cretácicas seguían correteando también los *multituberculados* que ya conocimos en el capítulo bautizado como "*Parque Jurásico*". Desgraciadamente hoy no los tenemos entre nosotros, como a sus primos, ya que desaparecieron en un momento de la siguiente era cenozoica hace unos 30 millones de años.

Habían contado con armas secretas que ya conocemos, entre otras la astucia, y con una nueva forma de conducta de apuesta segura: la *atención en el cuidado de sus crías* debió de ser decisivo para su éxito evolutivo. La alimentación parental durante la lactancia permitía al pequeño mamífero crecer hasta condiciones de adulto bajo la supervisión de sus padres. En el momento de su independencia sabía ya, por experiencia mimética, vivir como un adulto y se alimentaba como un adulto en un mundo conocido y testado. Esto suponía una gran ventaja frente al hacer de los reptiles, que nacen de un huevo como seres

solitarios e independientes, como minúsculas réplicas de sus padres, en un mundo que deben investigar por su cuenta, un mundo cambiante según van creciendo y en el que se van modificando sus necesidades, ajustadas obligatoriamente a su nivel de desarrollo de cada momento. Crecen despacio a una velocidad que depende del alimento que puedan conseguir por sí mismos, siempre en una situación de inferioridad e inseguridad, hasta que llegan a ser adultos. Qué grandes ventajas diferenciales para los mamíferos. Mamar y placentario. Animales sociales.



Diversificación filogenética de la clase mamífera según cronología propuesta por el biólogo Richard Dawkins. Nuevos descubrimientos adelantan la fecha de irradiación de los marsupiales a un momento anterior a los 160 maa (Imágenes a partir de wikimedia GFDL 1.2, CC BY 2.5 y CC BY-SA 3.0)

Como ya comentamos en otro capítulo, los verdaderos mamíferos, herederos de los reptiles mamíferoides, habían iniciado su andadura hace quizás unos 200 millones de años, a finales del periodo Triásico. El inicio de la posterior ramificación de su árbol filogenético tuvo lugar unos 20 millones de años después.

Monotremas

No sabemos datar muy bien cuando comenzó la saga de los modernos filos mamíferos. Aunque sí sabemos que todo comenzó en uno de aquellos

ancestrales animales que aún se reproducía por huevos, como los reptiles, y que habitaba en un remoto territorio austral. Se trataría del patriarca inicial en la línea de los mamíferos monotremas. La primera evidencia fósil que tenemos de ellos es de hace tan sólo 100 millones de años y corresponde a un individuo antecesor de la rama del ornitorrinco.

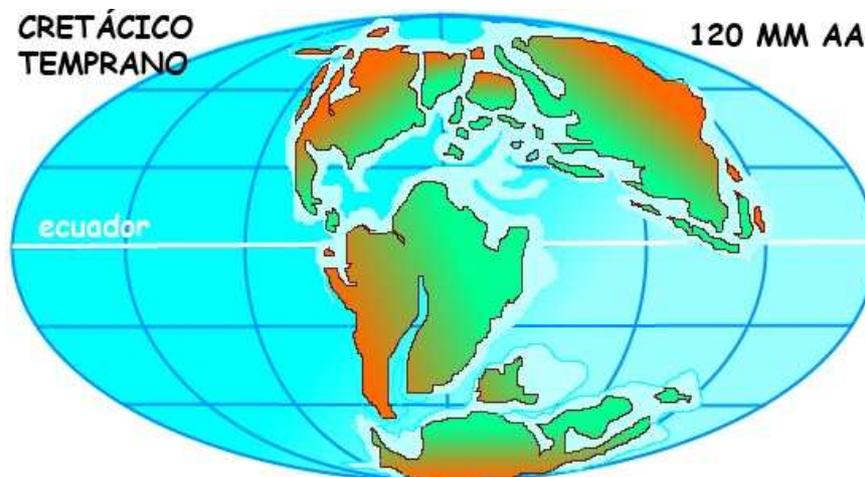
A pesar de tener su piel con pelos, las crías nacerían de huevos y las madres se encargarían de alimentar a sus crías mediante leche proveniente de una zona de la piel plagada de glándulas excretoras sin apariencia alguna de mama. Al igual que en los reptiles, la cloaca y el conducto urinario coincidían, por eso se les ha llamado “*un solo orificio*” o monotremas. Por aquella época todos los continentes del sur estaban unidos en Gondwana, lo que permite pensar que los monotremas pudieron extenderse con facilidad por este inmenso territorio. Con el tiempo desaparecieron de África, la Antártida y Sudamérica –en Argentina se han encontrado fósiles de un ornitorrinco- sobreviviendo exclusivamente en Australia, que es donde sus habilidades, que son muchas, fueron respetadas en su medio ambiente por la selección natural.

Con posterioridad a la radiación de la rama monotrema se produjo la separación de las otras dos subclases de mamíferos: los marsupiales y los placentarios. Como aparece indicado en varias de las figuras de este capítulo, basadas en la información que presenta el biólogo Richard Dawkins en su libro “*The ancestor’s tale*”, esta última radiación se produjo hace unos 140 millones de años. Sin embargo, los últimos estudios⁽⁹³⁾ de filogenia molecular parecen adelantar la fecha de separación entre marsupiales y placentarios unos 20 millones años, hasta los 160.



Juramaia sinensis un ancestral placentario de hace 160 millones de años.
(Imagen: Zhe-Xi Luo, fair use)

Esta circunstancia ha sido recientemente corroborada al haberse encontrado⁽⁹⁴⁾ en China restos fósiles de un nuevo placentario, *Juramaia sinensis*, cuya antigüedad corresponden a esta nueva datación de 160 millones de años.

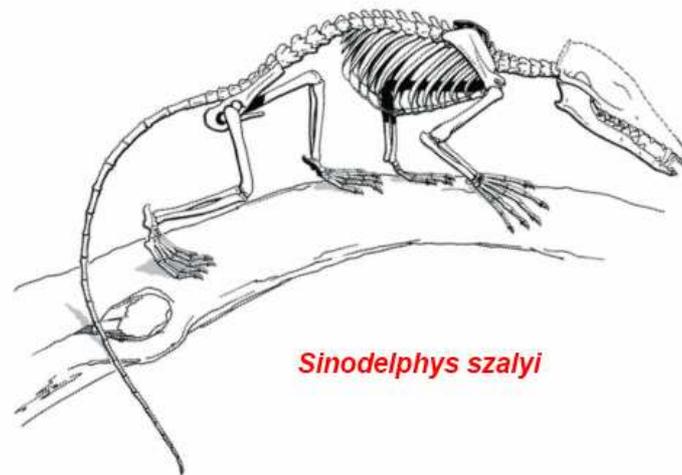


Hace 140 millones de años Gondwana se estaba partiendo en dos. Por un lado Sudamérica y África, que comenzaban a abrir brechas separadoras, y por otro lado el conjunto de Madagascar, India, Australia y la Antártida. Dos espacios aislados en donde el camino de la evolución tomó rumbos independientes.

Marsupiales

Por aquel entonces ya se había iniciado la radiación de los mamíferos marsupiales. En ellos se había producido un cambio revolucionario: una de las membranas internas del huevo se transformó para formar la placenta. Posiblemente eso sucedió al ser “infectado” el genoma de un mamífero por un retrovirus que portaba uno de los genes que tiene una función fundamental en el desarrollo de este órgano. Gracias a ello fueron vivíparos, aunque con una fase inicial de desarrollo incompleto del embrión en el útero materno. Cuando nacen lo hacen en un estado muy poco desarrollado, arrastrándose hasta la bolsa marsupial siguiendo un rastro de saliva que deja la madre, donde se encuentran los pezones a los que se fijan, permaneciendo allí durante un largo periodo de maduración.

La especie marsupial más antigua conocida se ha descubierto⁽⁹⁵⁾ en China, en la misma formación de Yixian que ya conocimos al hablar de las plantas angiospermas en un capítulo anterior. Corresponde a un fósil de 125 millones de años. Se trataría de *Sinodelphys szalyi*, un pequeño animal de unos 15 centímetros con costumbres arborícolas.



(Imagen: Zhe-Xi Luo et al., fair use)

Durante el Cretácico tardío se observa una distribución generalizada de este tipo de mamíferos, los marsupiales, por los continentes boreales antecesores de los actuales Norteamérica, Europa y Asia. Incluso se han encontrado indicios en Sudamérica. Dada la abundancia de fósiles en Norteamérica, hasta ahora se suponía que los marsupiales iniciaron su andadura en ese territorio, pero después del descubrimiento en el yacimiento chino de Yixian no está tan claro.

Hacia finales del Cretácico se cree que se ralentizó la actividad volcánica en las dorsales oceánicas, que así se hundieron bajo su propio peso. La consecuencia, observable geológicamente, fue una regresión generalizada de los mares que dejó al descubierto nueva superficie de tierras. Gracias a ello, a partir de Eurasia y a través del “istmo” de Bering los protoplacentarios, primitivos ungulados, colonizaron la antigua Norteamérica. Seguramente la presión de estos últimos con similares hábitos de alimentación hizo que los exitosos marsupiales de esta zona desaparecieran y emigraran hacia el sur, iniciando la colonización del ala sudamericana de Gondwana, de forma que llegaron a su extremo sur hace unos 40 millones de años. Aprovechando aún la cercanía de los continentes, saltando de isla en isla o arrastrados sobre un tronco a la deriva, emigraron a través del territorio común antártico, de forma que 10 millones de años más tarde habían llegado a Australia. De hecho se han encontrado⁽⁹⁶⁾ fósiles de esta época en la isla Seymour, situada en el extremo norte de la península Antártica. Parece ser⁽⁹⁷⁾ que los marsupiales australianos actuales derivarían de un único antecesor sudamericano del que procederían todos los marsupiales conocidos hoy en día.

En la actualidad Australia y Nueva Guinea son los únicos espacios en los que viven estos mamíferos, a los que hay que añadir las abundantes *zarigüeyas* o los menos extendidos *monitos del monte*, *comadreja*s *trompudas* o *yacas*, todos ellos habitantes de la patria de origen, Sudamérica. En cada uno de estos territorios aislados tuvieron una evolución diferente y paralela como marsupiales. Además, como no había una competencia con los mamíferos placentarios que prosperaban por Laurasia y África, evolucionaron en cada uno de los nichos ecológicos – marismas, estepas, bosques- hacia formas morfológicamente muy semejantes a las que habían llegado los mamíferos del norte en nichos semejantes de su territorio. Un claro ejemplo de evolución convergente, como ya se comentó en el capítulo 21 en donde analizábamos las posibilidades de la evolución.

Placentarios

Por último, los placentarios. Ya hemos comentado que los últimos datos parecen corroborar que surgieron en algún momento hace más de 160 millones de años, presentando una importante innovación en la evolución de los mamíferos: la placenta, que permitía la alimentación, respiración y excreción del feto dentro del útero materno, prolongando considerablemente el tiempo de gestación. Ellos abrieron paso a la evolución de la mayor parte de los mamíferos actuales, entre los que se encuentra el ser humano.

Como en el caso de la separación filogenética de marsupiales y placentarios, la datación de la diversificación de los placentarios también esta sujeta a la incertidumbre. Relacionado con ello hay un estudio⁽⁹⁸⁾ de la bióloga norteamericana Maureen O’Leary, publicado en 2013, realizado a partir de la información que proporcionan antiguos fósiles y animales de hoy en día. Se ha analizado no sólo aspectos de su diversidad genética, sino también se han teniendo en cuenta cientos de sus características morfológicas. Las conclusiones parecen asegurar que la aparición del primer placentario se produjo en un plazo muy breve tras la extinción del Cretácico/Terciario (de la que hablaremos en la próxima entrada), en la que desaparecieron los dinosaurios hace unos 65 millones de años.

La segura adquisición de más información en el futuro nos permitirá saber cuándo se inició realmente la rama de los placentarios; en esta serie seguiremos con la mayoría de biólogos que apoyan la datación más temprana del suceso. Dicho esto, avancemos un poco más en la evolución de los placentarios.

A pesar de que el hecho se inicia en el Cretácico, su esplendor de variación y riqueza morfológica se dará a partir de la nueva y próxima era Cenozoica. No obstante, presentamos ahora un esquema de las tres grandes familias evolutivas que en esos momentos ya se estaban diversificando, cada una con sus propios patrones según la particular zona geográfica en que se estaban produciendo sus radiaciones.

Patrón geográfico

Hace 105 millones de años África ya se había independizado, y quedó totalmente aislada de otros territorios hasta hace 40 millones de años. Sobre ella comenzaba a evolucionar una fauna muy particular de mamíferos placentarios: los **Afrotheria**. Mucho más tarde, y tras atravesar la crisis del Cretácico/Terciario, experimentarán una importante diversificación, ya que como veremos en el capítulo dedicado al Paleoceno, este superorden incluye animales tan dispares como el topo dorado, el elefante o los manatíes. El ancestro común de todos ellos, que apareció en el Cretácico, debió ser un pequeño habitante de los bosques, insectívoro o posiblemente herbívoro.



Edad de las radiaciones de los mamíferos durante el Cretácico y su distribución geográfica sobre los territorios de Pangea haciendo referencia a la toponimia actual (basado en la opinión de Richard Dawkins, "The ancestor's tale", 2004). Nuevos descubrimientos (2007) adelantan la fecha de irradiación de los marsupiales a un momento anterior a los 160 millones de años

Por su parte Sudamérica también quedó aislada, generando su propia fauna. Se cree que hace 95 millones de años un pequeño mamífero placentario con forma de musaraña inició el camino de los **Xenarthra**, los de las “*articulaciones raras*”, nombre que alude a que las articulaciones de las vértebras lumbares son diferentes a las de cualquier otro mamífero. También tuvieron que atravesar la crisis del Cretácico/Terciario, pero luego a partir de esta frontera se irradió hacia especies tales como la de los osos hormigueros, armadillos y perezosos, los cuales habitan exclusivamente en el continente sudamericano.

Y para terminar el patrón de distribución geográfica, hace 85 millones de años en Laurasia se estaba preparando un pequeño animal que más tarde daría lugar en este territorio fragmentado a nada menos que 2.000 especies de mamíferos placentarios, entre los que nos vamos a encontrar más tarde con la gran diversidad de los roedores, los carnívoros, insectívoros, ungulados, murciélagos e incluso los primates. Es la gran familia de los **Boreoeutheria**.

Pero pronto llegó la gran crisis.

La extinción Cretácico/Terciario, la última grande del Fanerozoico.

Hace 65 millones de años, al final de este acto, se produjo la extinción de diferentes especies que habían dominado la vida de mares y continentes. La segunda más cruenta en la historia del Fanerozoico.

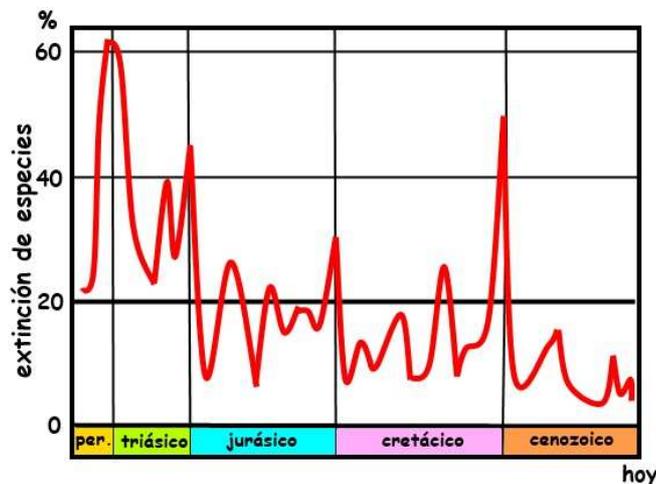
Se desvanecen las huellas de los dinosaurios...

En el mar, desaparecieron los ammonites y una gran cantidad de plancton... La vegetación, especialmente en Norteamérica, sufrió un drástico cambio. Allí desaparecieron los bosques que existían antes del suceso y tras la catástrofe las tierras fueron colonizadas por una espesa cobertura de helechos... Dantesco horror y destrucción... “El mal vino de fuera”...

Dejo en el aire el hilo de la historia con la promesa de desvelar el desenlace. Y como en las antiguas fotonovelas, concluyo, pues, con un... **continuará**.

45. La crisis del Cretácico/Terciario

El final del capítulo anterior tuvo un desenlace no previsto. Una crisis inesperada nos impidió hablar de una crisis realmente importante, el episodio de extinción de vida en la historia de la Tierra que ocupa el segundo lugar en la lista de los más graves. Hoy recogemos el testigo perdido. Para nosotros, los *Homo*, esta extinción tiene una especial importancia, ya que allí se inició el camino que llega hasta nosotros.



Sí, realmente fue un acontecimiento extremo, o bien un cúmulo de acontecimientos lo que nos llevó a lo que llamamos extinción del Cretácico/Terciario, extinción K/T o extinción K/Pg haciendo honor a la mayor ortodoxia geológica que introduce el uso de Paleógeno (Pg) sobre el clásico Terciario (T).

Iniciamos con un viaje panorámico sobre los resultados antes de intentar analizar los motivos. Hay que decir ante todo que el conocimiento sobre el desarrollo de esta crisis está en continua discusión. Es poca la diversidad geográfica de los datos fósiles conocidos, basados en su gran mayoría en lo que se sabe sobre la fauna y flora de lo que en aquel entonces era la actual Norteamérica.

Se han realizado multitud de estudios y aunque los datos, como se ha comentado, son geográficamente muy parciales, no se denota un rechazo frontal a la posible generalización global de sus resultados.

Dichos trabajos concluyen en la realidad de una gran extinción en la frontera del Cretácico con el Terciario, aunque discrepan en el ritmo con que pudo acontecer. Los resultados fueron terribles: un 50% de los clados vertebrados, marinos o terrestres, desaparecieron. Recordad que un clado es una familia completa de especies con un antecesor único común. Aunque en realidad el mal se repartió de distinta manera según los barrios. Los reptiles con escamas, como lagartos y serpientes, los marsupiales y los elasmobránquios, es decir, tiburones y afines, prácticamente desaparecieron. Los dinosaurios tuvieron aún menos suerte: se extinguieron para nunca más volver. Sin embargo, nuestros antepasados placentarios, así como otros reptiles -las tortugas o los cocodrilos-, los anfibios y los peces teleósteos, tuvieron un mejor perfil de supervivencia. Las aves menguaron sus filas, pero lograron atravesar la crisis. Quedaron algunos neornithes para refundar la clase, cosa que hicieron de forma espectacular durante el Terciario. Del mar desaparecieron los ammonites, una especie de caracol con concha plana -fósil icónico para muchos de nosotros- y una gran mayoría de bivalvos como los rudistas, que ya conocimos en un capítulo anterior participando en la formación de arrecifes. El nanoplancton calcáreo y los foraminíferos planctónicos experimentaron una gran reducción de sus especies. Recordad que la biota del plancton suele vivir principalmente en las primeras capas más superficiales del mar. Sin embargo, los foraminíferos bentónicos, de los fondos, sobrevivieron perfectamente a pesar de sufrir bastantes cambios morfológicos. Más adelante entenderemos el porqué de tan distintos efectos en animales tan parecidos: intuimos que la profundidad de su hábitat debió ser trascendental.

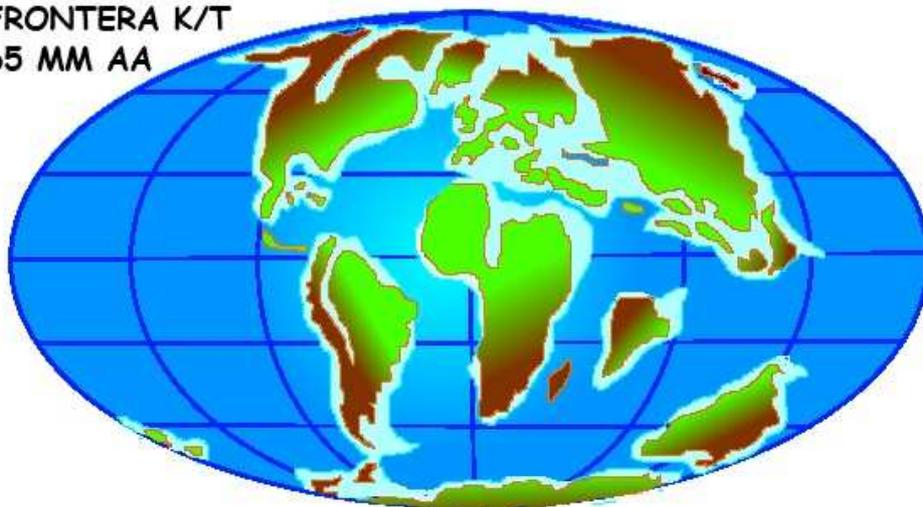
En las plantas fue también grave, ya que desapareció en el registro fósil casi el 60% de la megafloora -hojas, frutos, ramas, raíces...- aunque al seguir la traza de los pólenes fósiles el porcentaje se reduce casi a la mitad. El daño quedó también repartido según su localización geográfica, ya que fue mayor en las latitudes bajas e intermedias. En el mar fue peor, pues casi desaparecieron las plantas al completo debido posiblemente a un exceso de contaminación orgánica resultado de la gran mortandad producida. Aunque esta polución no fue tan mala para algunos, como explicaré un poco más abajo.

A partir de los datos estudiados se ha podido extraer un esquema general: en esta extinción tenías muchas armas para combatirla si eras un animal pequeño, acuático, de sangre fría y no amniótico, en contraposición con los que penaban a través de posiciones más débiles al ser grandes, terrestres, de sangre caliente y amnióticos. Tras una primera mirada nos sorprende

que esta compartimentación no case completamente bien con la exitosa historia de supervivencia de los placentarios. Pido paciencia. Más tarde veremos cuáles fueron las fortalezas particulares que contrarrestarían sus debilidades.

En fin, éste fue el núcleo de la crisis biológica de hace 65 millones de años. Son datos comprobados. Pero, ¿por qué sucedió? ¿cuáles fueron las particulares circunstancias del momento? Las condiciones de contorno medioambiental tuvieron que ser cruciales, en especial en los ámbitos de la geología y la atmósfera. Vamos a por ello.

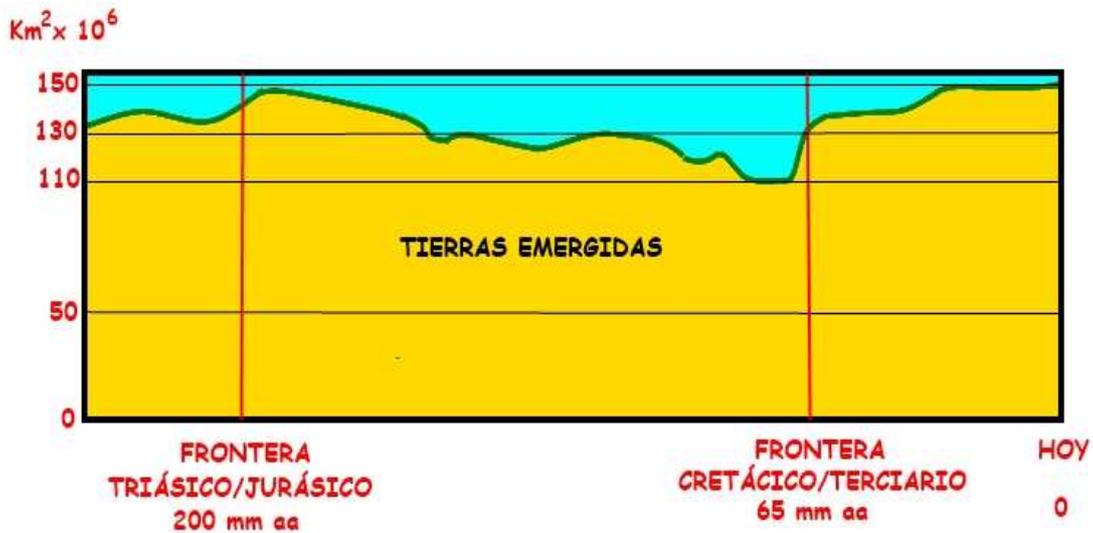
FRONTERA K/T
65 MM AA



En la época que nos movemos, el Cretácico tardío, los continentes “flotaban” muy desmembrados y aislados unos de otros, como puede verse en el mapa de arriba. Entre ellos el agua dibujaba mares someros en donde la vida prosperaba. Como dijimos en un capítulo anterior, se estaba viviendo un momento climático excelente, cálido y húmedo, con una distribución de temperaturas muy uniforme a lo largo y ancho del globo. No obstante, desde mediados del Cretácico se había iniciado una senda de enfriamiento que se estima pudo ser de unos 3 grados en la frontera con el Terciario.

El esquema geográfico de la figura anterior no iba a durar mucho, ya que se piensa que en aquellos últimos años del Cretácico, e inicios del Paleógeno, la actividad magmática de las dorsales oceánicas, que hasta entonces había sido muy intensa, redujo su dinámica. El resultado de esta descompresión en la base de las dorsales se concretó en el hundimiento de sus estructuras, que cayeron a cotas más profundas, dando su volumen a las aguas. La consecuencia obvia es que descendió el nivel superficial de éstas. Se estima que entre 150 y 200 metros, haciéndose muy evidente en las

zonas de mares poco profundos. Un nuevo mundo iba apareciendo del fondo de las aguas, de forma que se cree que en el momento de mayor regresión se habrían añadido a las tierras secas una superficie equivalente a la del actual continente africano.



Perfil de las regresiones marinas en los últimos millones de años. Hoy en día la superficie de tierras secas supone el 29% del total del planeta. A inicios de la regresión del Cretácico era tan sólo del 21%.

Imaginad. Las llanuras costeras en donde florecía la vida animal se iban quedando cada vez más alejadas de las aguas. Las tierras que iban emergiendo no tenían nada que ver con la amplia franja costera anterior. No eran llanas ni extensas. Quedaban fragmentadas y rodeadas de fondos marinos abruptos. Un paisaje de lagunas salinas de interior y archipiélagos aislados *pixelaban* el panorama. A medida que las aguas se retiraban, las marismas costeras iban perdiendo importancia, mientras que los ríos se hicieron más largos al tener que verter sus aguas hasta puntos de un mar cada año más lejano. Era evidente el tremendo cambio de los nichos en donde estaban acostumbrados a vivir y alimentarse algunos de los animales de entonces, en particular los dinosaurios.

El anterior esquema de regresión marina vivía en paralelo con un viejo proceso. La disminución de la actividad volcánica en las profundidades marinas, que habíamos comentado antes, no se había visto emparejada con lo que sucedía en algunos lugares de la superficie terrestre. El subcontinente indio “navegaba” solitario y a la deriva por zonas tropicales. En la región central oeste hacía años que se estaba produciendo lo que se conoce como los Traps del Decán, un fenómeno volcánico semejante al de las “*Siberian trapps*” de la crisis del Pérmico/Triásico. Se había iniciado

hace 69 millones de años y continuaría de forma intermitente hasta hace 63 millones de años. Un periodo en el que queda comprendido el momento de la extinción K/T, cuando precisamente se produjo un pico de emisión.



Vista de las Traps del Decán en las colinas Western Ghat al este de Mumbai, India (Wikimedia, CC BY-SA 2.5 Generic)

Hoy el lugar se le conoce como la meseta del Deccan, y sobre ella se asienta un volumen de basaltos que se estima superior a los dos millones de kilómetros cúbicos sobre una superficie de también dos millones de kilómetros cuadrados. Sí, sí. Habéis calculado bien: eso es una capa de mil metros de lava en promedio. Incluso hay zonas donde el espesor es de dos kilómetros y medio.

Este intermitente “humeo” a lo largo de tantos años produciría sin lugar a dudas un incremento de las partículas atmosféricas en suspensión, que se irían depositando o acumulándose en el aire siguiendo el ritmo de la actividad volcánica en el antiguo Decán. Este mismo ritmo sería el que marcaría el perfil de concentraciones de CO₂. El mundo se encontró durante mucho tiempo peleando entre los vaivenes en el contraste del enfriamiento provocado por la reflexión de la luz solar en la capa de polvo y el calentamiento consecuencia del incremento de efecto invernadero provocado por el dióxido de carbono.

Fuera cual fuera el juego en cada momento de ambas circunstancias antagónicas, ya sabemos que desde mediados del Cretácico las temperaturas estaban decreciendo, no mucho, pero siguiendo una clara

senda descendente. Es fácil imaginar que fueran tiempos revueltos durante los que el planeta y todo lo que sobre él se encontraba se vieran sometidos a un persistente y a veces sutil test de estrés, que seguramente se confabulaba con las consecuencias de la transformación y pérdida de los nichos tradicionales durante el proceso de regresión marina.

Hay diversidad de opiniones, y podemos asegurar que el tema no está muy claro. Pero hay un grupo de biólogos capitaneados por el norteamericano J. David Archibald que son capaces de observar en los datos una clara regresión en la diversidad de los dinosaurios a lo largo de los diez últimos millones de años del Cretácico, durante los cuales este superorden habría disminuido su diversidad taxonómica entre un 30 y un 50%. Es curioso que sus especies carnívoras resistieran mejor que las herbívoras el agotamiento de diversidad.

Bien es verdad que los estudios realizados se ocupan básicamente del espacio del antiguo territorio norteamericano, que en aquellos momentos estaba cruzado de norte a sur por un extenso mar interior en franca regresión. Los dinosaurios medraban en grandes manadas, parecidas a las de los actuales ungulados sobre la sabana africana, sobre las llanuras próximas al mar interior. Allí los herbívoros tenían fácil su subsistencia. Como se podía esperar, eran seguidos por los carnívoros dinosaurios terópodos, que gracias a la depredación sobre los anteriores también tenían una fácil subsistencia. La regresión de los mares iba alejando a estos placenteros lugares de lo que habían sido sus enclaves óptimos durante muchos años. Junto a la nueva quebrada línea de mar, la tierra recién emergida no favorecía el nuevo desarrollo de aquel tipo de nicho de alimentación. Quizás las tenues nubes de polvo del Decán habían también estresado la función fotosintética de las plantas. Lo cierto es que el resultado de todo lo anterior es el que conocemos. No pudo ser de otra manera. Con la pérdida de las zonas donde tenían su despensa, los animales herbívoros empiezan a decaer, siguiéndoles con posterioridad los carnívoros que se alimentaban de ellos.

¿Hubiera cambiado significativamente el mundo si algo más no hubiera alterado esta progresiva senda de tensión sobre las cadenas biológicas? Quién sabe. Posiblemente hoy aún se pasearía por las llanuras centrales norteamericanas, o junto a las planicies del curso bajo del río Guangdong en China, o por la Patagonia argentina, algún descendiente de los dinosaurios. Y si ésta hubiera sido la hipótesis, nosotros, lector y escritor, no estaríamos ahora aquí contemplando estas letras.

Pero no fue así. El curso de la vida que a finales del Cretácico discurría como siempre, acorralado entre sus estreses y sus oportunidades, se vio súbitamente alterado. Pero no diremos aún el porqué.

Antes vayamos de la mano del investigador norteamericano y futuro premio nobel Luis Walter Álvarez. En 1980 descubrió que, mezclado en el fino estrato geológico intermedio que separa el período Cretácico del Terciario, datado en hace 65 millones de años, había una concentración de iridio mucho mayor de lo que es habitual en la corteza de nuestro planeta. Además el fenómeno se repetía en muy diversos y alejados emplazamientos de la Tierra, es prácticamente un fenómeno global. Tras una larga historia de controversias, que podéis seguir de forma amena en el libro *“El enigma de los dinosaurios”* del periodista norteamericano John N. Wilford, la comunidad científica mundial acepto la tesis de Álvarez: el iridio provenía de un bólido exterior que habría impactado en nuestro planeta hace 65 millones de años.



*Representación artística del meteorito de Chicxulub
(Wikimedia, NASA, dominio público)*

El iridio es un trazador fiable de presencia de meteoritos, ya que los niveles de este metal de transición son generalmente más altos en aerolitos y otros objetos extraterrestres. En la Tierra, durante sus calientes inicios, se vio arrastrado por el hierro hasta posiciones próximas al núcleo, por lo que cuando nos lo encontramos en altas concentraciones en la corteza terrestre inmediatamente pensamos en que probablemente viene de un meteorito... por lo que el alto porcentaje de iridio en el estrato K/T se interpretó

definitivamente como el resultado de la colisión de un gran asteroide que en aquella época habría caído sobre la Tierra.

Mediante la extrapolación de la cantidad de iridio que se encuentra en esta capa geológica frontera se llegó a la conclusión de que se debía de tratar de un asteroide con un tamaño aproximado a los 10 kilómetros de diámetro. La cuestión que quedaba sobre la mesa era que había que encontrar el cráter del impacto para asegurar la exactitud de esta hipótesis.

Uno de los mayores problemas de la resolución del nudo era que en aquel momento no se sabía de algún cráter cuyas dimensiones correspondieran al tamaño calculado, que debería tener entre 150 y 200 kilómetros de diámetro. Al final se hallaron evidencias de uno, con un diámetro de unos 180 kilómetros, en la península de Yucatán junto a un reposado pueblo de pecadores llamado Puerto Chicxulub. El estudio del cráter parece indicar que el bólido entró con una inclinación de unos 45° y en dirección noroeste.



*Localización del cráter de Chicxulub en la península del Yucatán, México
(a partir de Google maps)*

Lo que viene a continuación es un pequeño compendio de lo que se dice pudieron ser las consecuencias del impacto.

Habría causado algunos de los mayores tsunamis de la historia de la Tierra. Una nube de polvo, cenizas y vapor habrían extendido el diámetro y área del cráter cuando el meteorito se hundió en la corteza terrestre en menos de

un segundo. El material excavado, junto con trozos del asteroide, habrían sido eyectados a la atmósfera por la explosión y se habrían calentado hasta convertirse en cuerpos incandescentes que habrían reentrado en la propia atmósfera terrestre, quemándola y posiblemente provocando incendios globales. Mientras tanto, enormes ondas de choque habrían causado terremotos y erupciones volcánicas globales. La emisión de polvo y partículas podrían haber cubierto la superficie entera de la Tierra durante varios años, posiblemente una década, creando unas condiciones de vida muy difíciles para los seres vivos.

La producción de dióxido de carbono provocada por el choque y por la destrucción de rocas carbonatadas habría causado un dramático efecto invernadero. Otra terrible consecuencia del impacto la produjeron las partículas de polvo de la atmósfera, las cuales habrían impedido que la luz solar llegara a la superficie de la Tierra disminuyendo drásticamente la temperatura. La fotosíntesis de las plantas habría quedado así interrumpida, afectando a la totalidad de la red trófica.

Si atendemos a la lista presentada por el paleontólogo británico Michael Benton en 1990, allí podremos leer hasta 66 causas de la extinción de los dinosaurios, algunas tan “ocurrentes” como “decrepitud cerebral seguida del consiguiente estado de estupidez” (sic). Sin embargo aunque eso es *lo que se dice*, no todo ello es *lo que se cree* que pasó. Y lo que se cree que pasó es aquello que resulta apoyado por un manojito de evidencias más o menos importantes o plausibles.

Que nos llevan de la mano hasta una corta tipología de causas, aquellas que merecen mayor consenso o respeto entre los expertos.

Empecemos echando un vistazo al famoso estrato de transición en el que ya sabemos que el contenido de iridio es sospechosamente alto. En esta misma capa, y con una distribución prácticamente global a lo largo del planeta, se encuentran una serie de microesférulas, las *tectitas*. Estas microesférulas fueron producidas tras la reentrada en la atmósfera terrestre de todo aquel material que fue fundido en el impacto y lanzado cual cohete balístico a trayectorias suborbitales. Son el resto de un gigantesco y global castillo de fuegos artificiales producido durante la reentrada del material eyectado en la atmósfera, momento en que se fracturaba y alcanzaba la incandescencia, condensándose en pequeñas esferas que emitirían durante unas pocas horas y desde cualquier punto del cielo un tremendo flujo de energía infrarroja.



Una tectita que presenta una cavidad resultante de una burbuja de gas. Microesferas de este material vítreo iluminaron el cielo durante los inicios de la crisis K/T (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

La energía asociada a este pulso infrarrojo se ha estimado a partir de la cantidad de esférulas que se encuentran en el estrato K/T y de consideraciones cinéticas en sus trayectorias de entrada. Y los resultados dicen que en aquel momento en la atmósfera, a unos 70 kilómetros de altura, se estaba movilizandando una energía del orden de los 10^8 J/m^2 -¡mil millones de veces la energía de una de las bombas atómicas que los Estados Unidos de Norteamérica arrojó sobre Japón!-, lo que calentó las capas de la atmósfera a esta altura hasta una temperatura del entorno de los 1.000K. Y esto durante el corto intervalo de las primeras horas tras el impacto. A la vista de lo cual me atrevo a decir: ¿qué importa lo que viniera después?

Cualquier atisbo de vida que quedara expuesto a la tremenda radiación acabaría incinerado. Sólo sobrevivió aquel que pudo ocultarse. Bastaba una protección de tan sólo diez centímetros de tierra o rocas sobre tu cabeza o estar sumergido bajo agua cuya capa más superficial disipaba por evaporación la terrible energía radiante de aquel radiador que a 70 kilómetros de altura se puso a 1.000K ¿Entendemos ahora el porqué del mayor éxito de los foraminíferos bentónicos sobre los planctónicos? ¿Entendemos el éxito de los pequeños animales terrestres como los placentarios?

La biosfera vegetal terrestre lógicamente no podía aprovecharse de estas protecciones. Por lo que hay que pensar que se iniciaría casi a la vez la

combustión de una buena parte de esta masa a lo largo de toda la extensión del planeta, incendios que durarían días y que llenaron de hollín la atmósfera, en donde se uniría al ya generado durante el impacto que quemó los abundantes hidrocarburos subterráneos de la zona. Hollín que quedó también almacenado prácticamente a lo largo de toda la capa de transición K/T en proporciones muy elevadas. En este estrato se concentra una cantidad equivalente a como si se hubiera quemado el 10% de la biomasa vegetal actual.



Vista del estrato límite Cretácico-Terciario: Capa Negra de Caravaca, junto a la ciudad murciana del mismo nombre, España (Foto: Antonio del Ramo, fair use)

Tras las pocas horas radiantes del pulso de radiación infrarroja, el humo y el hollín de los incendios, unidos al polvo residual levantado tras el impacto físico del meteorito, inducirían una época de oscuridad. La función fotosintética se ralentizó dando una explicación adicional a la importante extinción de la megafloora que pudiera haber escapado de la quema. El descenso temporal de la temperatura, consecuencia de la crisis de luz solar, tampoco favorecía una rápida recuperación. En los mares se notó poco esta crisis gracias a su gran capacidad de absorción térmica, pero en tierra se cree que se vivieron entre dos y seis meses de temperaturas congeladoras. De todas formas el frío no debió ser un actor muy condicionante, ya que sabemos que muchos animales de sangre fría lograron sobrevivir con éxito. Tortugas, cocodrilos y anfibios se encargaron de atestiguarlo. Por no hablar de la supervivencia de las abejas

tropicales que precisan de una buena temperatura (en el entorno de los 30 grados) para vivir ellas y las flores de las que se alimentan.

Los animales herbívoros perdieron sus fuentes de alimentación. Los carnívoros, detrás de aquellos, perdieron también sus fuentes de alimentación. El mundo se llenaría de residuos, de cadáveres animales y vegetales. Una magnífica oportunidad para los detritívoros y saprofitas, incluyendo plantas y hongos, o para aquellos que aceptaban una dieta variada sin hacer ascos a la carroña. De ahí que algunos insectos lo tuvieran fácil. De aquí también que algunos animales insectívoros lo tuvieran fácil. En el mar tenemos un buen ejemplo de lo que contamos. Los animales sobrevivieron con más facilidad, al estar protegida la vida por el agua, pero sobrevivieron mejor aquellos animales cuya alimentación estaba basada en la cadena de detritos en comparación con los que dependían de la producción primaria de nutrientes -los dependientes de las plantas vivas. El fondo marino siempre ha sido el depósito general con un aporte especial en estos momentos que caía desde la superficie como una abundante lluvia fina. Y realmente se ha podido constatar que fue un buen momento para los detritívoros de estos lugares. De nuevo comprendemos mejor el éxito de los foraminíferos bentónicos.

¿Lluvia ácida? ¿Terremotos? ¿Tsunamis? Evidentemente que allí estuvieron, pero tuvieron efectos muy menores. La lluvia ácida que afecta en gran medida a los ecosistemas acuáticos debió tener muy pocas consecuencias: ya dijimos más arriba que si eras un animal de agua dulce tenías muchas ventajas en aquellos pocos años infernales. En cuanto a terremotos y maremotos, evidentemente no fueron motivo de extinciones globales, aunque obviamente donde alcanzaran sus martillos el daño debió ser tremendo. En cualquier caso fueron comparsas, como la influencia de las *Deccan traps* o de la regresión marina, durante el proceso de extinción masiva.

Estamos llegando al final. Y es el momento de reproducir unas frases del inicio de la entrada:

“En esta extinción tenías muchas armas para combatirla si eras un animal pequeño, acuático, de sangre fría y no amniótico, en contraposición a los que ostentaban posiciones más débiles al ser grandes, terrestres, de sangre caliente y amniótico. Tras una primera mirada nos sorprende que esta compartimentación no case completamente bien con la exitosa historia de supervivencia de los placentarios”.

Ahora podemos entender mejor estas frases. Un animal pequeño pudo esconderse mejor en su madriguera o bajo una roca. Un animal acuático se vio mejor protegido por la columna de agua sobre sus cuerpos. Un no-amniota era más fácil que tuviera sus pequeños huevos bajo protección en tierra o bajo el agua. Con respecto a la sangre fría creo que su aparente ventaja procede de motivos puramente circunstanciales del momento, a pesar de que *per se* contaban con muchos de los números en la mortal lotería. Los que más suerte tuvieron les llegó porque pudieron protegerse bajo agua o tierra. Además, no hay que olvidar que entre los animales ectotérmicos abundan los del tipo insectívoro o detritívoro.



Esto es una musaraña actual. Es opinión bastante generalizada entre los biólogos que algunos de los mamíferos que sobrevivieron a la extinción debían ser muy parecidos a este animal (Wikimedia, dominio público)

¿Y qué hay de los mamíferos? No todos tuvieron la misma suerte, ya que en la catástrofe desaparecieron el 85% de los marsupiales, hoy en día con una pequeña población confinada en Australasia y Sudamérica. Y podemos suponer que algo parecido les pasó a los monotremas, aún más escasos. Por contra, los placentarios se llevaron el premio. Sin lugar a dudas les salvó su pequeño tamaño, gracias al que pudieron encontrar mil guaridas donde esconderse rápidamente. Les salvaron sus habilidades para vivir de múltiples recursos alimentarios, entre los que se encontraban insectos y carroña. Les salvó el “descaro” vital que proporcionaba su metabolismo “turbo” a sus pequeños organismos. El oportunismo que les había permitido sobrevivir con éxito en un mundo dominado primero por los cocodriliformes y luego por los dinosaurios fue lo que les salvó en los momentos apurados del tránsito al Terciario. Como muchos otros

supervivientes, estas habilidades les permitieron ser los primeros en aprovechar los nichos vacíos que dejaron los dinosaurios al desaparecer de la faz de la Tierra. Y tras 65 millones de años de desarrollar su cadena evolutiva, conseguir que uno de los suyos, un bípedo hirsuto, inteligente e insaciable, impusiera su voluntad sobre casi todo lo que había surgido hasta entonces. No nos emocionemos: Gaia tiene siempre la última palabra.

Tras este gran desastre de la extinción K/T se acaba el Mesozoico. La Tierra necesitó aún unos 300.000 años para estabilizar de nuevo su clima. La época cálida y húmeda que empezó cuando la ruptura de Pangea, y que se mantuvo unos 150 millones de años más a lo largo de toda la era de "*Vida intermedia*", se prolongaría aún en el tiempo adentrándose en el inicio del Cenozoico.

Poco después el paraíso climático iba a sufrir una profunda transformación en pocos millones de años. Lo iremos viendo en los próximos capítulos, comenzando en el siguiente por la habitual panorámica de geología, climatología, geografía y atmósfera de una nueva era. Nos veremos pues en la "*nueva vida*", que es lo que significa Cenozoico.

46. Comienza el Terciario

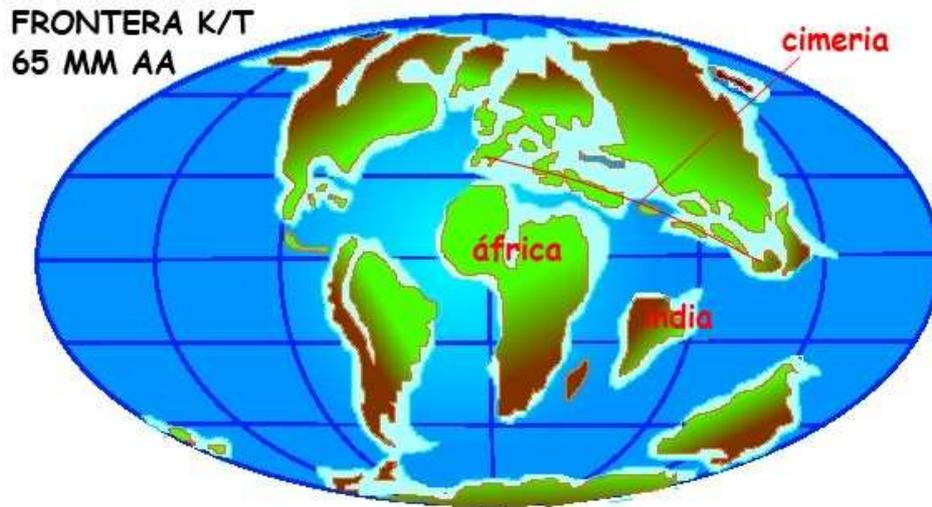
A partir de este capítulo vamos a dar un salto cualitativo que hace que parezca que nos adentremos en un nuevo mundo, más actual, más próximo al que conocemos. El anterior nos sirvió como colofón a épocas ancestrales: El Mesozoico, que había durado 186 millones de años, lleno de extraños reptiles, ubicuos dinosaurios, megaorganismos y mamíferos casi desaparecidos del mapa, o el Parque Jurásico de Spielberg. A partir de ahora encaramos la última recta de la evolución. Nos quedan tan sólo los 65 millones de años del Cenozoico. Estructuraremos el viaje compartimentándolo de acuerdo a las épocas en que geológicamente se le divide, aunque en el presente capítulo inicial haremos un repaso general de todo el periodo, contemplando su geografía, geología y clima.



Sí. Por delante nos esperan los últimos 65 millones de años de nuestra querida Tierra, durante los que nosotros, los mamíferos, radiamos toda la inmensa diversidad de nuestras especies. Desde nuestro mezquino punto de vista antropocéntrico nos hemos atrevido a bautizar a estos años como *la era de los mamíferos*. Aunque también podríamos haberla llamado la edad de los peces teleósteos. El 96% de los peces actuales conocidos son teleósteos, y muchos radiaron también en esta era. O el de las aves carnívoras que durante 20 millones de años se situaron a la cabeza de los depredadores. Pero no nos va a temblar el pulso: ¡las muchimillonarias en número bacterias, sus primas las arqueas, los desconocidos hongos, protistas en general, artrópodos, peces, anfibios, reptiles y aves, todos tuvieron sus momentos de gloria! ¡Ahora nos toca a nosotros, los mamíferos!

¡¡Qué comience el último acto!!

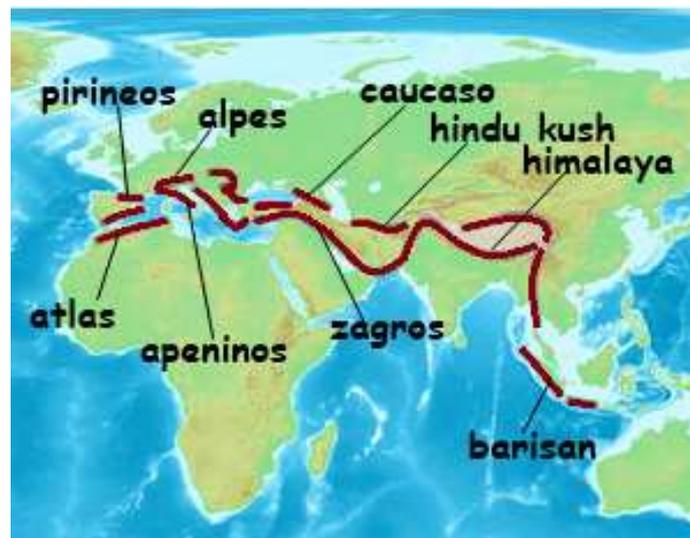
Aparece en escena el Cenozoico, llamado así a partir del griego *καινός/kainos*, “nuevo” y *ζωή/zoe*, “animal o vida”, que de forma altamente explícita quiere decir: era de los “animales nuevos”. Esta era está dividida en dos periodos: el Terciario, que dura casi toda su extensión, y el Cuaternario que abarca los últimos 2,5 millones de años.



La geología y geografía

Por entonces la Tierra presentaba una disposición continental semejante a la de hoy en día, con un inicio de territorios desmembrados, grandes masas de tierras aisladas que se movían bajo la batuta de las fuerzas tectónicas. A lo largo de todo el periodo anterior, el Mesozoico, las rocas y montañas formadas en las anteriores orogenias, sobre todo en la carbonífera Herciniana, se habían ido erosionando y roturando, formando grandes sedimentos que ya antes del comienzo del Cenozoico comenzaron a ser de nuevo reciclados y reactivados. Sus materiales se vieron deformados, fracturados y metamorfizados, borrando las huellas procedentes de orogenias más antiguas y dándoles un nuevo aspecto, base del que contemplamos hoy en día. La presión que se ejerció por el choque de las placas africana, del subcontinente indio y la pequeña cimmericiana -en la que se encontraba la microplaca ibérica- sobre la masa continental de Eurasia provocó lo que llamamos el *ciclo orogénico Alpino*. Algunos lo inician ya en la época de sedimentación y reciclado del Mesozoico y otros emparejan su comienzo con el del Cenozoico, cuando empieza la formación de las principales cadenas montañosas del sur de Europa y Asia desde el Atlas, junto al Atlántico, pasando por el Mediterráneo, Asia

central y el Himalaya y terminando en las islas de Indonesia, en el más alejado océano Índico.



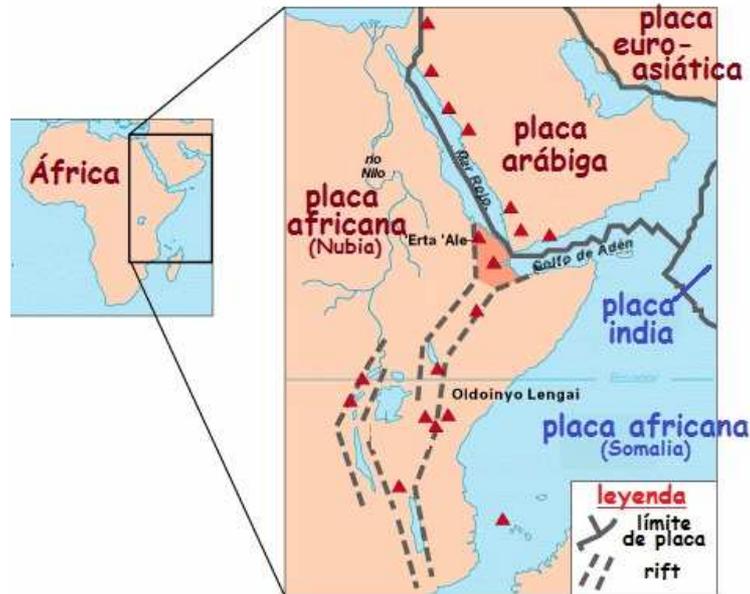
Extensión de la Orogenia Alpina (a partir de Wikimedia, dominio público)

Si vemos el mapa de inicio de esta entrada, datado hace 65 millones de años, podremos imaginar las derivas de los continentes. La India comenzó a chocar con Asia hace cerca de 55 millones de años, iniciándose así la formación del Himalaya y la elevación de la meseta del Tibet hace entre 52 y 48 millones de años. La presión de la placa africana generó las montañas centrales propias de la orogenia alpina, que abarcan la formación entre otros de los Alpes y Cárpatos en Europa y el Atlas en el norte de África, y que se elevaron entre 37 y 24 millones de años atrás. Este proceso aún continúa a día de hoy.

Hace unos 35 millones de años Australia y la Antártida, que ya viajaban solas, se separaron, lo que fue el punto de partida para la formación del casquete helado sobre esta última al permitir la circulación de las corrientes frías circumpolares, como explicaremos más tarde.

Por la misma época Arabia se estaba separando de la placa africana a través de un tremendo rift que iba desde el mar de Tetis al océano Índico y que penetraba hasta el centro de África. El Gran Valle del Rift es una tremenda fractura geológica cuya extensión total es de unos 5.000 kilómetros en dirección norte-sur. Aunque generalmente se habla de este valle para referirse sólo a su parte africana, lo cierto es que el mar Rojo y el valle del río Jordán también forman parte de él, incluso el brazo lateral del Golfo de Adén. Comenzó a formarse en el sureste de África -donde es más ancho- hace unos 30 millones de años y sigue creciendo en la

actualidad tanto en anchura como en longitud, expansión que con el tiempo se convertirá en una cuenca oceánica. De hecho ya lo es en la zona del mar Rojo gracias a su comunicación con el océano Índico.



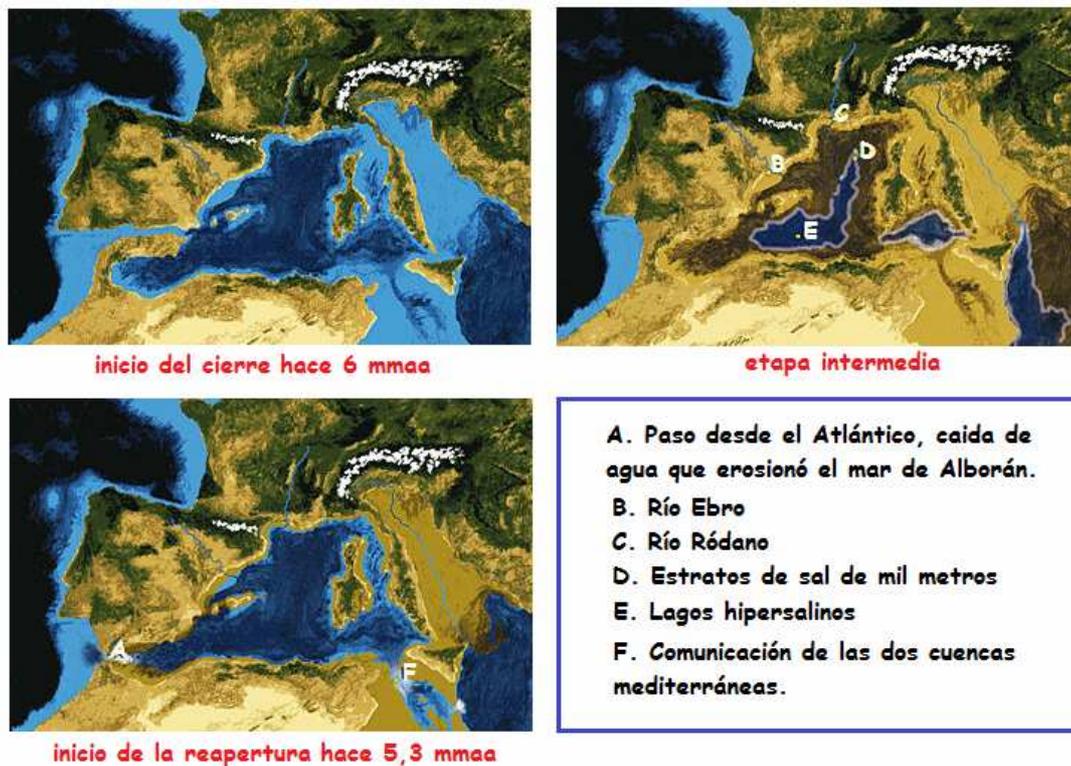
Apertura del Gran Valle del Rift africano (a partir de Wikimedia, dominio público)

En un principio la deriva de Arabia cerró el mar de Tetis por el este, conformando al que sería el futuro Mediterráneo. En el mismo movimiento de aproximación de África sobre Eurasia se fue paulatinamente estrechando Tetis, hasta que hace 6 millones de años quedó cerrado el “estrecho de Gibraltar” desecándose el Mediterráneo y formándose inmensos depósitos de sales. Es lo que se conoce como la *crisis salina Messiniense*. Hay que imaginar el largo periodo mientras se iba cerrando el cada vez más estrecho brazo de agua, durante el cual la velocidad de desecación del mar interior fue superior al de reposición de agua desde el “estrecho de Gibraltar” o por sus ríos interiores: el Mediterráneo se constituyó así en la gran salina mundial. En ella había acabado un buen porcentaje de la sal de los océanos, los cuales experimentaron una crisis salina al reducirse su salinidad global en hasta un 2 por mil.

El suelo del mar Mediterráneo, al perder el peso del agua que contenía, se elevó entre decenas y centenares de metros. El paisaje que emergió del fondo debió asemejarse a una región semi desértica, con lagunas de aguas salobres, por donde los animales podían pasar de África a Europa por su propio pie. Hay documentados en las proximidades de la ciudad española

de Valencia, restos de camellos africanos datados en esta época. Los ríos que desembocaban en esta tremenda cuenca vacía lo hacían a través de capas sedimentarias antiguas, formando grandes cañones de hasta mil metros de profundidad semejantes al cañón del río Colorado, como los gigantescos cañones excavados por el Nilo o el Ródano.

En la fase más crítica del aislamiento de la cuenca mediterránea hace 5,3 millones de años, las condiciones de nivel del Atlántico o de erosión en el istmo entre ambas cuencas fueron tales que las aguas rompieron el dique que las separaba, rellenando de nuevo la inmensa cubeta mediterránea. Por diversos estudios⁽⁹⁹⁾⁽¹⁰⁰⁾ geológicos se conjetura que el ritmo de llenado fue brutal, de forma que el nivel pudo haber subido hasta unos diez metros diarios. Por aquel entonces comenzaban a andar por el mundo los primeros homínidos.



Representación artística de la evolución del proceso de desecación del Mediterráneo durante el Cenozoico (a partir de Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

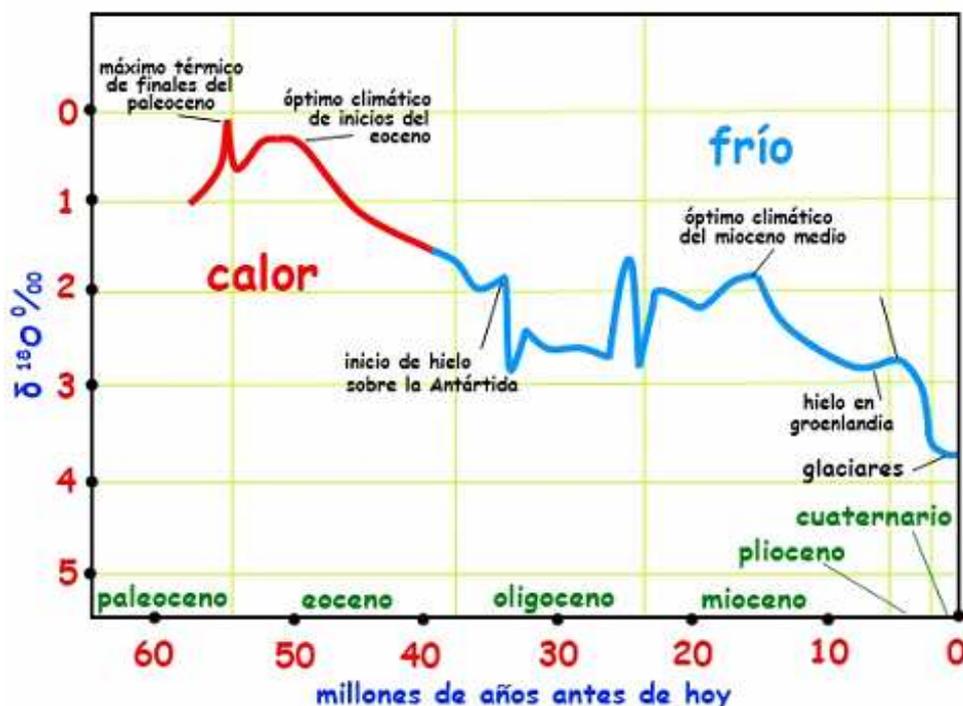
Otro de los acontecimientos geológicos más importantes del Cenozoico fue la formación del istmo de Panamá hace unos tres millones de años. La aproximación de las placas de Norteamérica y de Sudamérica provocaría una elevación del terreno en el punto de colisión a la vez de un

extraordinario vulcanismo. La consecuencia fue la aparición en la zona intermedia de innumerables islas que con el paso del tiempo fueron uniéndose al rellenarse los canales que las separaban con los sedimentos de ambos continentes. El cierre del istmo supuso, por un lado, un cambio climatológico brutal en el planeta, que posiblemente facilitó definitivamente la congelación del casquete polar septentrional, y por otro el fin del aislamiento de la fauna sudamericana, ya que el puente hizo más fácil a animales y plantas el migrar entre los dos continentes.

Con esto concluimos el análisis del *escenario geográfico* del Cenozoico. Pasemos ahora a desgranar el *escenario climático*, el otro elemento crucial en el campo de la selección natural y la evolución de la Vida.

El clima

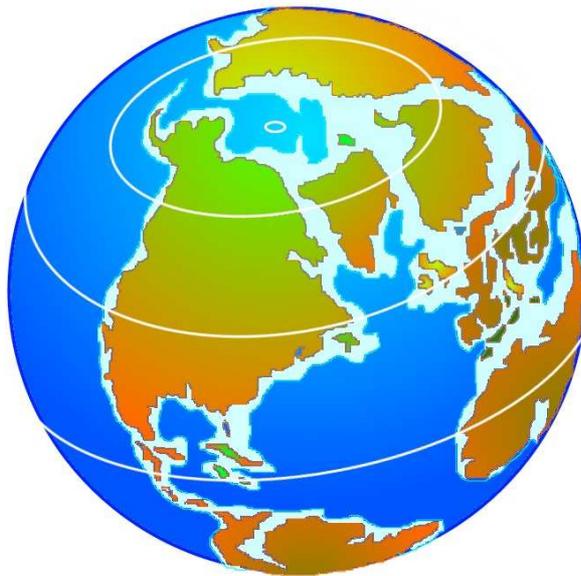
El Cenozoico comenzó conservador: mantuvo en sus inicios el clima caluroso heredado de finales del Mesozoico. Tras este primer periodo de clima benigno se inició hace aproximadamente 40 millones de años un definitivo enfriamiento, modulado en una primera fase por un estancamiento de las temperaturas para después emprender un camino progresivo y constante hacia temperaturas más bajas, finalizando con una última era glacial, edad en la que nos encontramos actualmente.



El enfriamiento general del Cenozoico (a partir de "Historia del clima de la Tierra", Antón Urtiarte)

La figura anterior muestra esta tendencia (en términos de concentración del isótopo ^{18}O) durante los últimos 60 millones de años de historia de la Tierra. La correlación de este isótopo con la temperatura ambiente se explica por el hecho de que en épocas frías el agua con el isótopo 18 se evapora con más dificultad, por su mayor peso, que como lo hace la que tiene en su molécula el más abundante ^{16}O . Debido a esta circunstancia se va incrementando la concentración del ^{18}O en el mar y disminuyendo su presencia en las precipitaciones y por tanto en los hielos. Por el análisis de este isótopo en los restos fósiles de caparazones de foraminíferos en el mar y de los sondeos de los mantos de hielo de Groenlandia y la Antártida, se pueden conocer las temperaturas de una época.

Pasemos a explicar las teorías que explican el perfil de temperaturas de la figura anterior. Como se puede apreciar, dentro de una tendencia generalizada al incremento del frío, presenta muchos episodios de recuperación de la temperatura.



Mapa frontera entre el Paleoceno y el Eoceno, hace unos 55 millones de años. El Ártico quedaba bastante protegido por la posición de los continentes boreales.

A comienzos del Cenozoico el planeta sufre uno de los más rápidos y extremos calentamientos de su historia, subiendo las temperaturas medias hasta 7°C en latitudes altas. La duración de esta etapa fue de menos de 100.000 años. Se supone que este sobrecalentamiento se vio favorecido por

la especial configuración de tierras alrededor del Ártico que impidió que éste se congelara evitándose el consiguiente efecto “nevera” en el resto del planeta. Este incremento de temperaturas provocó importantes extinciones de especies, tanto animales como vegetales, que marcan la diferencia entre las formas de vida del Paleoceno y las del Eoceno.

En los años frontera entre el Paleoceno y el Eoceno se mantiene este régimen de altas temperaturas con un clima global que fue el más homogéneo de todo el Cenozoico. La diferencia de temperaturas entre el ecuador y los polos era la mitad de la actual. Las corrientes profundas en los océanos eran excepcionalmente cálidas y las regiones polares, templadas.

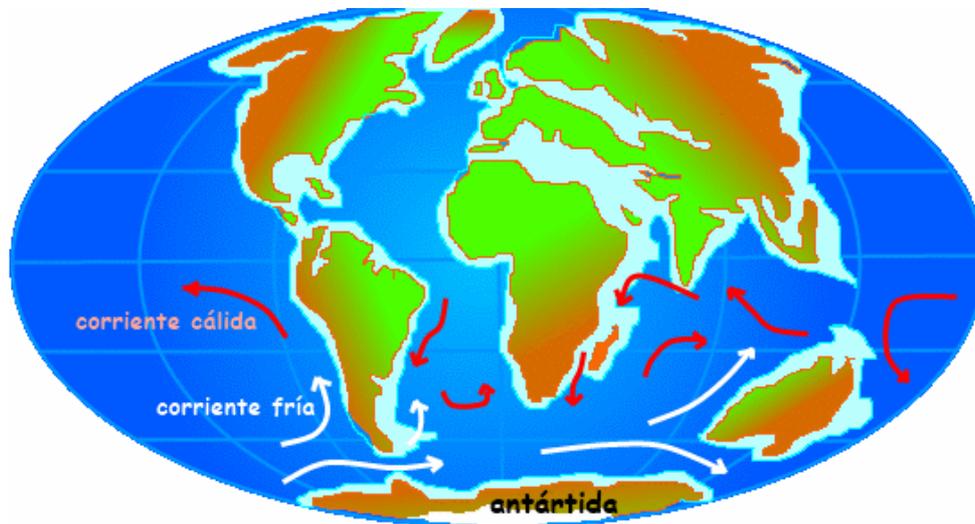
Aunque pronto, aún dentro del Eoceno, comenzó el declive de las temperaturas. Esto supuso el inicio de lo que iba a ser más tarde un largo periodo de clima “nevera”, durante el que se llegaría a situaciones en las que en cualquier estación del año se podían encontrar mantos de hielo abundante recubriendo la Antártida e incluso Groenlandia.

Son varias las causas que se barajan para explicar esta bajada de temperaturas en el planeta que sucedía cuando el calendario marcaba el año 50 millones antes de hoy.

Algunos oceanógrafos creen que debido a los movimientos geológicos tan importantes que se estaban produciendo en aquellos momentos, entre los que habría que tener en cuenta la propia deriva de las placas continentales, se indujeron *cambios en la circulación de las aguas oceánicas* que a su vez provocaron *cambios en la circulación atmosférica* y, como consecuencia, una modificación de la temperatura de las aguas profundas marinas. Tras 15 millones de años ésta pasó de los 12°C a los 6°C (hoy en día está en el entorno de los 2°C). A este fenómeno se le unió un *descenso en la concentración del CO₂* con la consiguiente disminución del efecto invernadero.

Si seguimos avanzando por la curva de temperaturas de un poco más arriba veremos que hace unos 35 millones de años se produjo un brusco descenso coincidiendo en lo que allí se describe como el inicio de los hielos sobre la Antártida. En aquel momento se estaba separando Australia del continente antártico, lo que hizo que se abrieran mares que dejaron a este último aislado del resto de tierras y en la posición del Polo Sur. Esta especial *configuración de tierras en la Antártida* permitió que las corrientes frías circumpolares aislaran a este continente de la posible influencia de las

corrientes cálidas tropicales. A partir de entonces se cubrió de un casquete glaciario que aún dura en la actualidad.



Posible distribución de las corrientes marinas en la zona de influencia de la Antártida hace 35 millones de años, tras la apertura del canal circumpolar por la separación del continente australiano

Como consecuencia del secuestro del agua en las inmensas capas de hielo sobre la Antártida se indujo una *disminución de la humedad atmosférica*, lo que incidió en el clima, además de que *descendieron los niveles de las aguas* de los mares. Ambas circunstancias hicieron que se incrementara la superficie de tierra con un clima continental. Este tipo de clima es conocido por ser muy extremo, siendo las diferencias de temperaturas entre invierno y verano enormes, así como entre el día y la noche. Los veranos son calientes y los inviernos muy fríos, con muchas heladas. Por lo general las lluvias son escasas, debido a que este clima se produce en zonas alejadas del mar y con una atmósfera seca como era la de aquel momento. Esto influyó en la biota vegetal, que sufrió una regresión en las latitudes altas del hemisferio norte en donde los bosques de coníferas dieron paso a la tundra.

Hacia finales del Oligoceno (hace unos 25 millones de años) se invirtió temporalmente el proceso, de forma que en toda la primera parte de la siguiente época, el Mioceno, se incrementó y mantuvo un nivel de temperaturas más alto aunque aún dentro de un entorno frío.

El nuevo máximo de temperatura se alcanzó en el Mioceno Medio, entre hace 17 y 14,5 millones de años que es cuando, como consecuencia de ello, el volumen de los hielos de la Antártida vuelve a disminuir y el nivel del

mar se eleva. Se sabe por los análisis de los fósiles oceánicos y continentales que en aquel momento las temperaturas en las latitudes medias fueron 6°C superiores a las actuales. Gradualmente las latitudes altas del hemisferio norte vuelven a hacerse más cálidas, por lo que las coníferas recuperan de nuevo posiciones a costa de la regresión de la tundra.

Mientras, la concentración del CO₂ seguía disminuyendo, atemperando el efecto invernadero y colaborando en el reencuentro de la senda de enfriamiento progresivo de la Tierra.



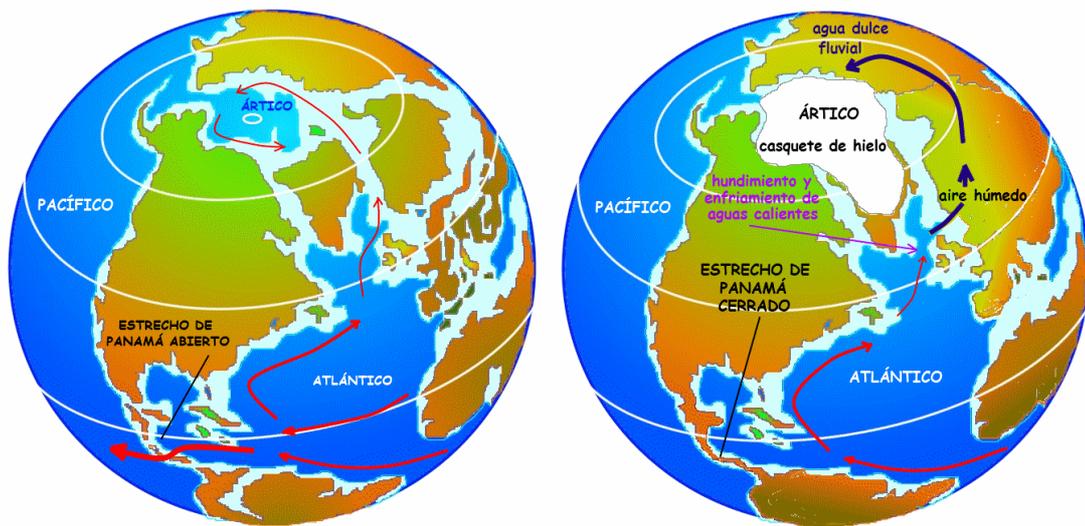
Evolución de la concentración de CO₂ (según datos extraídos de Pagani, 2005⁽¹⁰¹⁾)

Avancemos un poco en el tiempo. Hace 7 millones de años, aún en el Mioceno, una variación en la inclinación del eje de la Tierra hizo que los periodos de insolación sobre las zonas polares disminuyeran. Ello provocó un crecimiento de los hielos de la Antártida y la aparición de un casquete glacial norte hasta latitudes de Groenlandia.

Ya a inicios del Plioceno, dos millones de años y medio después, se vuelve a invertir la tendencia, alcanzándose un máximo en las temperaturas hace unos tres millones de años. Se le conoce como el óptimo climático del Plioceno medio. Las temperaturas medias habían subido también, esta vez por la dinámica de los continentes, llegando a valores unos 3°C superiores a los actuales. No se sabe muy bien el porqué de este fenómeno, aunque se cree que las corrientes oceánicas tanto del Pacífico como del Atlántico eran tan potentes que ayudaron a unificar las temperaturas norte-sur. De todas

formas, tras este reducido lapso de tiempo la tendencia al enfriamiento continuó.

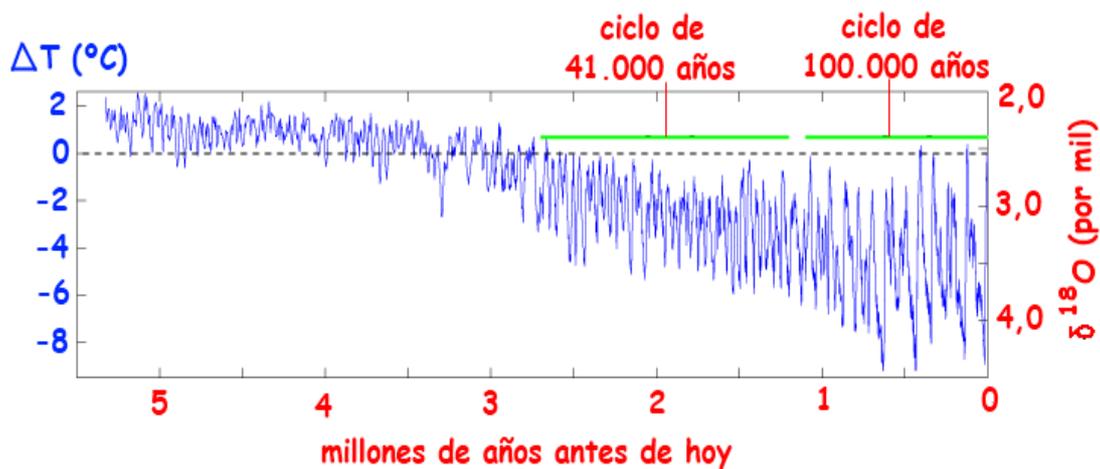
Una de las posibles explicaciones del nuevo impulso a la baja es el incremento de los hielos, ahora en el boreal Ártico. Por esa época, hace tres millones de años, se acababa de cerrar el istmo de Panamá, lo que reforzó la corriente del Golfo en su viaje por la costa este americana. Antes, parte de esta corriente se perdía hacia el Pacífico por el “estrecho” de Panamá. La nueva situación tuvo como consecuencia dos efectos. El *primero* es que en las latitudes más nórdicas del Atlántico las aguas se volvieron más calientes y la atmósfera más húmeda, por lo que los vientos del oeste llevaron más lluvias sobre el norte del continente euroasiático. Los ríos de la vertiente norte se volvieron más caudalosos, provocando una disminución de la salinidad de las aguas árticas, con lo que el punto de congelación subió facilitando el aumento de la masa helada.



Disparador del enfriamiento de la era terciaria. Las corrientes árticas antes y después de cerrarse el estrecho de Panamá.

Por otro lado, la corriente del Golfo, al no desviarse en parte por el “estrecho” de Panamá, hacía que tras su camino hacia el norte lamiendo las costas americanas llevaran más cantidad de sales a las latitudes árticas. A más sal más densidad del agua, o lo que es lo mismo, más peso. Por lo que antes de llegar al Ártico la corriente se hundía, perdiéndose su aporte térmico. Anteriormente al cierre de Panamá esto no sucedía así. Las corrientes de aguas llegaban con menor salinidad, por lo que se mantenían superficiales a lo largo de un mayor recorrido. El aporte térmico inherente a estas corrientes podía penetrar por tanto más profundamente en el Ártico, lo que dificultaría la creación de hielos.

El progresivo crecimiento del casquete Ártico, unido a las intensas lluvias provocadas por la corriente del Golfo tanto en Eurasia como en el norte del continente americano, produjeron grandes nevadas en estos territorios. Su acumulación permitía que durase la nieve hasta pasado el verano. Esto hizo que los mantos de hielo ocupasen cada vez latitudes más meridionales durante el Cuaternario, realimentándose el proceso gracias al incremento del albedo terrestre por el que reflejaba una mayor cantidad de radiación solar. El enfriamiento generalizado sufría una serie de avances y retrocesos, con un ritmo aproximado a los 100.000 años, que se cree que estaban modulados, por un lado, por los ciclos de rotación del eje de la tierra (cada 40.000 años), y por otro, por las variaciones de la excentricidad de la órbita terrestre, dando como resultado cuatro grandes glaciaciones en el último millón de años, amén de un sinfín de otras menores.



NOTA: ΔT (°C) con relación al estudio de Petit et al. 1999

Perfil de la evolución de las temperaturas en los últimos cinco millones de años a partir de un estudio⁽¹⁰²⁾ del isótopo $\delta^{18}O$ en los carbonatos de foraminíferos bentónicos. Se puede apreciar en su variabilidad las secuencias alternantes de periodos glaciales e interglaciares en los últimos millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported, nota: J. R. Petit et al 1999⁽¹⁰³⁾)

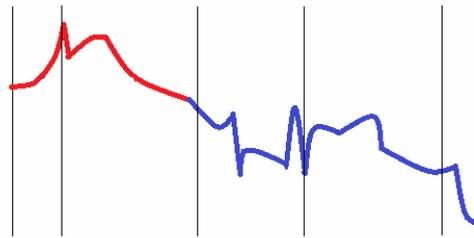
Y así hasta el día de hoy en el que, aunque inmersos desde hace 10 mil años en el periodo postglaciar del Holoceno, se supone que estamos experimentando un calentamiento climático.

Somero prólogo, anuncio de lo que vendrá, sobre la biota del Terciario

La biosfera prosiguió amoldada al vals del clima y las temperaturas. Con una complejidad quizás similar a la de épocas anteriores, pero

aparentemente más prolija gracias en parte al grado de conocimiento que disponemos de ella. En los siguientes capítulos nos vamos a encontrar paseando por los brotes más extremos del árbol filogenético, infinitos en forma y diversidad. A partir de aquí, la sensación de que la biografía de la Vida se transforma en un lago cabrilleante es absoluta. Reverbera acá y allá haciendo que concentremos nuestra atención en los puntos que más brillan. Hay tantos que hay que dejar de lado a muchos de ellos, forzados por el obligado avanzar de esta historia. Nuestro relato a partir de aquí va a intentar hacer un seguimiento de lo más sorprendente desde el punto de vista de la curiosidad antropocéntrica, cabalgando a lomos de un hilo conductor que nos ate al relato: la secuencia climática de los últimos 65 millones de años.

El siguiente icono nos hará de guía en las próximas entradas. Se trata de una imagen estilizada del perfil de temperaturas del Cenozoico que ya dibujamos un poco más arriba.

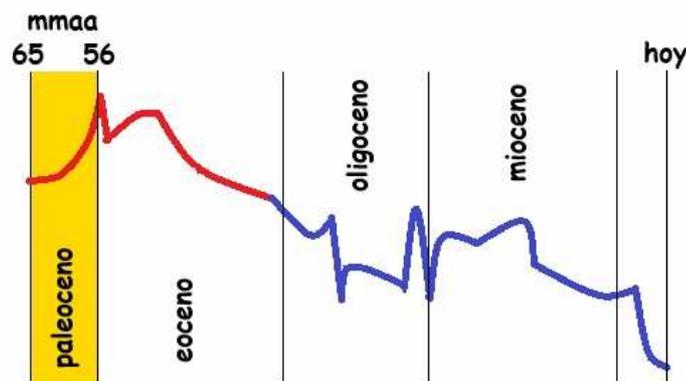


Nos servirá de recordatorio para rehacer una imagen mental de las condiciones de contorno durante esos años: una cúspide inicial de temperaturas seguida de un descenso importante, para mantenerse hacia mediados del periodo marcando una nueva meseta antes de iniciar la caída en picado hacia la era de las glaciaciones. Y todo ello en un escenario geográfico de territorios aislados. Ésta será la senda a seguir a partir del próximo capítulo.

47. El Paleoceno

En el capítulo anterior nos habíamos adentrado en una nueva era, el Cenozoico. Allí hicimos una descripción del escenario general, su geografía, geología, climatología y atmósfera. Hoy toca situar a los actores, iniciando cronológicamente el relato por la época del Paleoceno.

El gráfico siguiente nos irá haciendo de guía a lo largo de todas las entradas dedicadas a la descripción de esta era cenozoica. El perfil corresponde al de temperaturas que ya estudiamos en la entrada anterior. Y es que hay una clara correlación⁽¹⁰⁴⁾ entre los sucesos climáticos de esta era y la evolución de las especies.



El Paleoceno comenzó con un clima cálido y tropical.

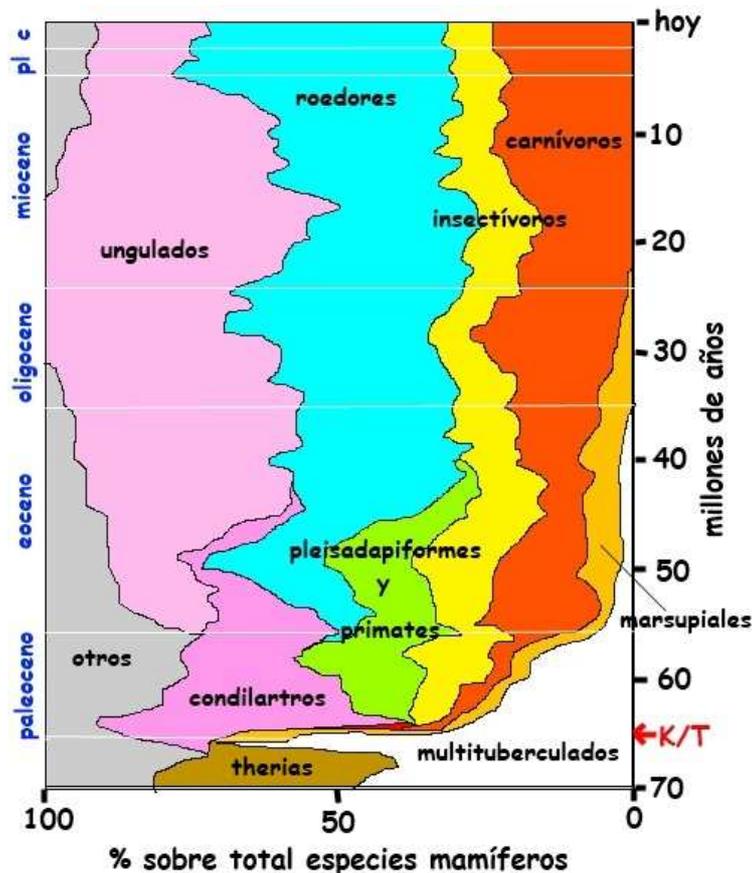
Paleo-ceno(zoico), “antigua-nueva vida”, toda una declaración de intenciones. La Vida siguió adelante y se tuvo que sobreponer a la tremenda crisis K/T ocasionada en gran medida, como ya sabemos, por el impacto de Chicxulub, acontecimiento con el que se cerró la esplendorosa época del Mesozoico. Era un mundo donde las plantas estaban sufriendo su particular calvario, donde habían muerto muchos de los grandes animales y los mejor preparados para seguir adelante soportaban las consecuencias de la catástrofe como buenamente podían.

Habían desaparecido los dinosaurios, acabando así la presión que ejercían sobre el resto de habitantes del planeta. Hay una correlación clarísima que hace evidente que a los mamíferos supervivientes esta circunstancia les vino bien. El éxito de su radiación y de su diversidad se hizo pronto

evidente. Por algo en la entrada anterior habíamos decidido conceder a esta era el título de la “*de los mamíferos*”.

A la vista de ello nos preguntamos: ¿Cómo pudo continuar la vida? Y, ¿con qué rapidez se produjo la recuperación?

La historia de los mamíferos en Norteamérica nos permite imaginar el esquema general de lo sucedido a nivel global. Por el estudio de sus fósiles se ve que ya desde los primeros miles de años tras la crisis los placentarios habían iniciado una senda hacia mayores tamaños corporales.



Esquema aproximado de la radiación de los mamíferos en Norteamérica tras la crisis Cretácico/Terciario. Es evidente la explosión de diversidad en los primeros 10 millones de años tras la crisis (según información⁽¹⁰⁵⁾ de John Alroy, Universidad de California)

En el entorno de los 3 a 5 millones de años después (ver figura anterior), aunque hay biólogos que opinan que el proceso fue más lento -hasta 10 millones de años-, no solamente se había consolidado esta circunstancia sino que también se observa en el registro fósil la gran diversidad de especialización ecológica que caracterizará a las sucesivas especies de

estos mamíferos a lo largo de todo el Cenozoico. La misma, con distintas morfologías corporales, que conocemos a día de hoy.

A los diez millones de años tras la macroextinción se extendían sobre el planeta los roedores, la diversa fauna de los bosques, los grandes herbívoros y carnívoros... Los placentarios habían sabido aprovechar toda la casuística de los vacíos nichos vitales antes utilizados por los dinosaurios. Hoy en día los mamíferos con placenta experimentamos un amplio abanico de formas y estrategias de vida. Desde el minúsculo murciélago abejorro, con su gramo y medio de peso, hasta la ballena azul de 190 toneladas, practicando en la movilidad todo tipo de pericias, como en los ejércitos que se pasean por tierra mar y aire, zapadores incluidos, y habiendo desarrollado esquemas muy variados de inteligencia.

Como veremos también, las plantas, las aves o los peces experimentaron en el Paleoceno unos grandes éxitos en sus carreras evolutivas y de diversificación. Una auténtica explosión de vida nueva.

Tras esta vista panorámica vamos a ir desgranando una por una las andaduras de cada uno de los participantes.

Comencemos por las Plantas

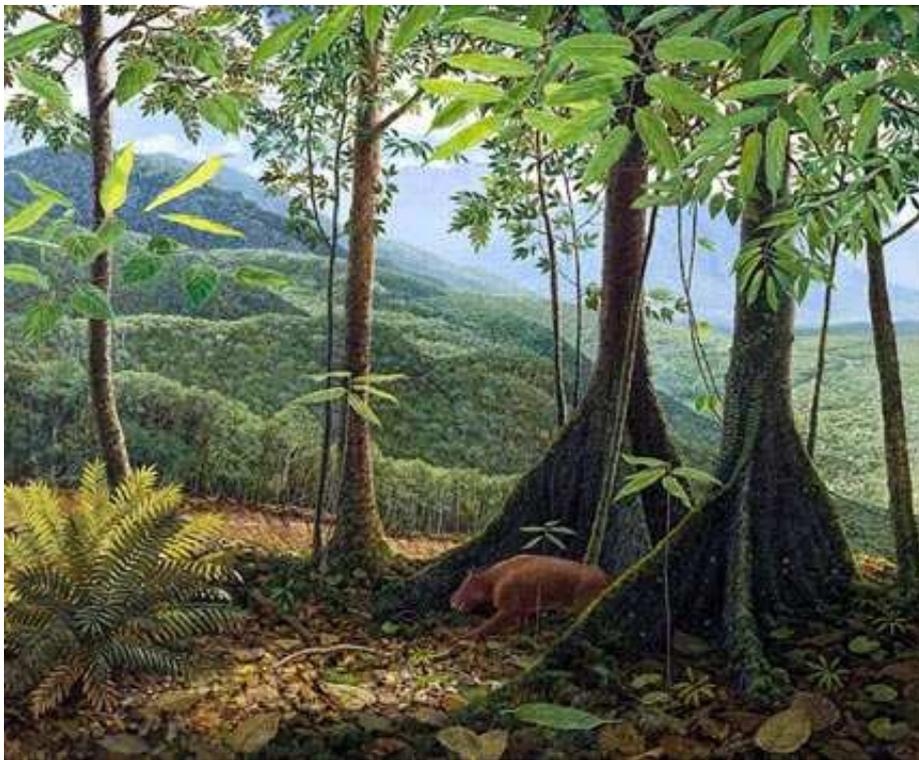
Habíamos comentado en el capítulo anterior que en toda esta primera época del Cenozoico continuó el clima húmedo y cálido del Cretácico. Quizás culpa de ello la tuvo el dióxido de carbono, que en aquellos momentos más que duplicaba su concentración en la atmósfera con relación a la actual. El CO₂ suponía efecto invernadero, es decir, calor. Pero también abundante materia prima aprovechable en los procesos de fotosíntesis de los vegetales a través del ciclo de Calvin (podéis refrescar estos temas en los capítulos 7 y 8). La gran ventaja para las plantas es que sus ciclos reproductivos se basan en semillas o esporas, estructuras preparadas para soportar mejor las situaciones de estrés. Gracias a esta circunstancia su recuperación tras la crisis K/T fue menos traumática que la de los animales. De hecho, eso es lo que se observa al analizar su registro fósil: un agudo perfil temporal de merma seguida de una rápida recuperación.

Todas estas circunstancias favorables, unidas al vacío en los hábitats tras la catástrofe, fomentaron el que poco a poco se fuera de nuevo rellenando de plantas el planeta. A inicios del Paleoceno se observa en el mundo vegetal un gran incremento de fósiles de pólenes de helechos, señal evidente del efecto de la crisis sobre los inmensos bosques anteriores cuyos

emplazamientos fueron ocupados por estas oportunistas arbustáceas. Los helechos son a menudo las primeras especies que colonizan las zonas dañadas, como sucede en la actualidad tras un incendio forestal.

Al poco tiempo las angiospermas comenzaron rápidamente a recuperarse, de forma que vuelven a ser las dominantes del panorama durante el Paleoceno como lo fueron a finales del Cretácico. Posiblemente en este camino fueron apoyadas por la actuación de los insectos, ya que se observa un proceso de coevolución entre ambos tipos de organismos.

La crisis había pasado y la Tierra comenzaba a cubrirse de espesos bosques al amparo del amable clima. En general las masas arbóreas debían ser más densas que durante el Mesozoico, ya que no tenían la presión depredadora de los grandes dinosaurios herbívoros, y los registros fósiles así lo atestiguan. En Castle Rock, Colorado, se han encontrado restos de un bosque húmedo datado en hace 63,8 millones de años en el que ya prosperaban las angiospermas, coníferas, helechos y cícadas, con una tipología semejante a la de las actuales selvas ecuatoriales. Lo mismo sucede en el yacimiento de Cerrejón, Colombia, datado en hace 58 millones de años, en donde los especímenes vegetales fósiles son los mismos de los actuales bosques tropicales sudamericanos.



Recreación de un bosque húmedo del Paleoceno (Autor: Jan Vriesen, Denver Museum of Nature and Science)

Está claro que en los nuevos bosques de los trópicos han aparecido por primera vez los fenotipos de las selvas húmedas modernas. Los territorios más secos no se quedaron rezagados, y en ellos evolucionaron plantas adaptadas a sus condiciones. Se empezaron a ver cactus y palmeras, incluso en lo que hoy es territorio de Alaska. Y esto se sabe⁽¹⁰⁶⁾ porque se ha logrado recuperar de los fondos marinos de la Antártida polen fosilizado de palmeras del Eoceno inferior, hace entre 55 y 48 millones de años, lo que confirma la presencia de bosques tropicales muy diversos y revela unas temperaturas invernales cálidas. Y si nos desplazamos a latitudes tan altas como las de Groenlandia y Patagonia, una por el norte y la otra por el sur, en un momento en que las regiones polares se encontraban libres de hielos, también se observa que estas zonas se vieron recubiertas por bosques de coníferas y modernas angiospermas de hoja caduca. Estas últimas perfeccionaron sus estrategias reproductoras mediante el truco de adelantar la floración al nacimiento de las hojas para favorecer la polinización por parte de los insectos.

Hace 60 millones de años aparecen por primera vez las *plantas de flor compuesta* de las que es más que justo el hacer una mención especial dada su ubicuidad, importancia ecológica y su utilidad para los seres humanos. Su complejo diseño floral es extremadamente eficiente en lo que respecta a la fertilización del óvulo y a una exitosa diseminación de las semillas. Por otro lado, tienen un curioso metabolismo adicional mediante el que producen una serie de compuestos químicos, como aceites aromáticos, que no sólo les sirven para su propio desarrollo, sino también como defensa frente a los predadores o a posibles enfermedades. En un futuro muy próximo, como veremos en un capítulo posterior, se producirá el gran éxito de las plantas herbáceas, el cual posiblemente se deba a este tipo de floración.

Seguiremos con las Aves

La crisis se había llevado por delante a las aves pioneras del Cretácico, tales como las marinas *Hesperornithyformes* y las ubícuas *Enantiornithes*. Podemos rememorar su existencia revisando el capítulo 43. No obstante, como no podía ser menos dadas las favorables condiciones medioambientales, las aves supervivientes de la extinción K/T comenzaron pronto una fase de nueva radiación y diversificación, apoyada en las oportunidades de los vacíos nichos ecológicos, que dio como resultado formas ya muy similares a las de las aves modernas. Eran las *Neornithes*, las “nuevas aves“. El proceso tras la crisis fue muy rápido, concretándose en la radiación explosiva de

16 nuevos órdenes repartidos entre sus dos superórdenes: el Paleognata, en la que se incluyen a aves tan diferentes como las perdices y todas las no voladoras -avestruces, emúes, ñandúes y hermanas-; y el Neognata, del que ya conocemos su incipiente presencia en el Cretácico con los Anseriformes y Galliformes, y que un poco después del límite del Paleoceno con el Eoceno incorporaría la radiación de todos los grupos de los pájaros modernos. En resumen, tan “sólo” 10 millones de años tras la frontera K/T ya estaban presentes la mayoría de órdenes de aves a excepción del de los pájaros a los que les faltaba muy poco. En la actualidad están clasificadas dentro de 28 órdenes con más de 10.000 especies.

Por su singularidad haremos mención a unas aves que debieron ser los matones del barrio en aquella época y durante muchos años después. Están extintas y sólo se las conoce por sus fósiles: las “*aves del terror*”, que nacidas en el Paleoceno dominaron durante las épocas intermedias más frías del Cenozoico. Originarias de Sudamérica, sus especies más grandes llegaron también a colonizar el hemisferio norte tras la formación del “istmo centroamericano”, constituyéndose como los predadores que estaban en la cima de la cadena trófica, uno de los carnívoros más temibles de su tiempo. Tendrían una talla de entre uno y dos metros y debían ser extremadamente rápidas en las grandes llanuras donde vivieron.

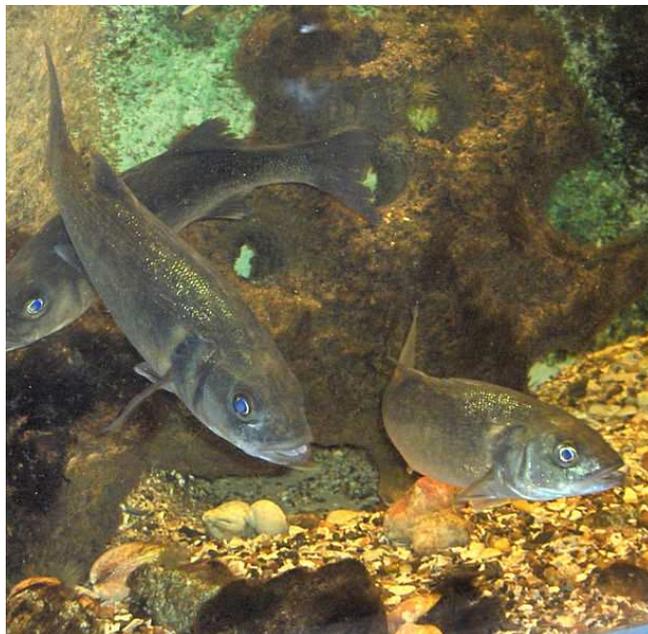


Representación artística de Titanis, una de las conocidas como “aves del terror” (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Y con los Peces

La masacre había sido bastante más suave bajo la protección de una capa de agua. Habían sufrido más aquellos animales cuyos hábitats se habían modificado de alguna manera, como fue el caso de los peces cartilagosos -tiburones y rayas- que, acostumbrados a vivir entre aguas dulces y saladas, veían cómo los ríos vertían sus aguas a mares cada vez más alejados de su nacimiento. Pero la buena época les llegó también a ellos. En el Paleoceno se recuperaron los tiburones y se acabó de completar la radiación de especies en los peces actinopterigios, los que tienen aletas soportadas mediante radios espinosos, que habían aparecido allá por el Carbonífero. Y de esta clase, los que obtuvieron un particular éxito de diversificación fueron los teleósteos, es decir aquellos peces más comunes que podemos identificar modernamente en nuestras pescaderías, como los salmones, merluzas, barbos...

A partir del abundante registro fósil de los teleósteos se observa durante esta época un sustancial incremento en la variedad de formas así como una predominancia, que llegará hasta nuestros días, de su familia Perciforme, los peces con forma de perca tanto de agua dulce como salada. Besugos, doradas, el rape o el salmonete nos permiten saber de que hablamos.



Un par de lubinas, otro ejemplo de peces perciformes (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Son animales bastante voraces y están especializados en un amplio abanico de presas según sea su tamaño. Desde otros peces a crustáceos,

plancton o incluso desparasitando a sus vecinos. Hay dos circunstancias corporales que les acompañan en su camino a la cima taxonómica y que sin lugar a dudas tuvieron relevancia para ello. Uno fue el nuevo diseño de planos corporales generales, diferentes a los que se veían anteriormente durante el Cretácico; y otro la modificación de la inserción de las aletas dorsales y anales, base de novedosas estrategias de movimiento. Apuntaría una tercera más de tipo de hábitos: el hueco en la depredación dejado por la crisis de los tiburones fue aprovechado rápidamente por este tipo de peces.

Como resumen, podríamos decir que en el nuevo mundo acuático se produjo un cambio en las posiciones predominantes, perdiendo los tiburones su ventaja en favor de los peces teleósteos. En la actualidad, unos 60 millones de años después, el número de sus diferentes especies alcanza la impactante cifra de 20.000, aproximadamente una tercera parte de la de todos los vertebrados.

Y Reptiles

No nos olvidamos de los reptiles. Tras el golpe recibido en la transición del Cretácico al Terciario se recuperaron, mostrando inicialmente unos tamaños corporales que solían ser más pequeños que los de etapas anteriores, aunque rápidamente algunos especímenes alcanzaron tamaños desmesurados. El cálido clima en aquel momento permitiría a los animales de sangre fría, como eran todos los reptiles, alcanzar mayores dimensiones que los actuales. Hoy en día también encontramos a los “gigantes” en el trópico, mientras que los más pequeños viven en zonas muy alejadas del ecuador. Aunque hay una teoría⁽¹⁰⁷⁾ que pone lo anterior en cuarentena. El metabolismo de estos grandes animales generaría tal calor que les sería imposible vivir en entornos de temperaturas entre 30° y 34°, por lo que deducen que los tamaños corporales derivados a partir del estudio de los fósiles serían muy exagerados. O que no es el clima quién decide el tamaño, porque grandes, lo que se dice grandes, los había muuuy grandes. En el registro fósil comienzan a ser abundantes los vestigios de tortugas, cocodrilos, lagartos y serpientes. Vamos a por cada uno de ellos.

Los fósiles de tortuga del Paleoceno se encuentran distribuidos prácticamente por todos los continentes, encontrándose en Europa, Norteamérica y Sudamérica así como en África. Merece la pena hablar de *Carbonemys cofrinii*, la “tortuga del carbón”, encontrada⁽¹⁰⁸⁾ en el rico yacimiento colombiano de la Formación de Cerrejón.

Con un cráneo de 24 centímetros y un caparazón de 1,72 metros, disponía en consonancia unas potentes mandíbulas. Un lento aunque vigoroso kart capaz de comer de todo, incluso a pequeños cocodrilos.



*Trabajos en el desenterramiento del caparazón de *Carbonemys cofrinii* en el yacimiento de Cerrejón (Foto: Edwin Cadena paleontólogo jefe de la excavación)*

Y hablando de cocodrilos... la crisis K/T prácticamente había dejado como supervivientes a los dirosauridos. Encontramos a sus fósiles en casi todas las zonas del planeta y con una gran variedad de formas dentro de unos también variados hábitats acuáticos. Una de sus principales características que diferencian unos de otros es la forma del cráneo-hocico. Los había de mandíbulas largas y estrechas con múltiples y afilados dientes, que indican una alimentación primaria basada en peces, y los de mandíbulas cortas y anchas, con dientes parcialmente redondeados, que predarían sobre grandes animales como las tortugas. También en la Formación de Cerrejón se ha encontrado el fósil de *Cerrejonisuchus*. No se trata de una especie de grandes dimensiones, unos 2 metros de longitud, y es del tipo de mandíbula corta, lo que indicaría una evolución hacia una dieta generalista que habría desarrollado al aprovechar algún nuevo nicho de la selva tropical sudamericana. Lo curioso de este cocodriliforme es que con toda seguridad era a la vez predador y predado por mor de su pequeño tamaño ¿Quién era aficionado al costillar de *Cerrejonisuchus*?

Una serpiente ¡Asombroso! No tanto si pensamos que hoy pasa lo mismo entre caimanes y anacondas. Sí, el Paleozoico fue la época de las megaserpientes, comenzando con la que se tomaba de aperitivo a nuestro

amigo el cocodrilo colombiano: *Titanoboa cerrejonensis*. Por su nombre ya deduciréis que sus fósiles se han encontrado también en el yacimiento de Cerrejón junto a los del cocodrilo. De la anchura de sus vértebras, 120 milímetros, sus descubridores han deducido⁽¹⁰⁹⁾ una longitud de hasta $12,8 \pm 2,2$ metros y un peso de bastante más de una tonelada, dejando pequeña a la actual gigante *Pitón reticulatus*, de 8,7 metros. En Argentina se han encontrado fósiles de la serpiente *Chubutophis* con una longitud estimada de 10 a 12 metros, y en el sureste del Sahara a *Gigantophis garstini*, que superaría los 10 metros. Un Paleoceno lleno de récords.

De los lagartos sólo mencionar al acorazado *Glyptosaurinae*, de la familia de los ánguidos, que agrupa a todos los animales sin patas del suborden de lagartos. Habitaba en los continentes boreales.

Para acabar con los Mamíferos

Vamos ahora a por los que subieron al trono de los antiguos reyes. Tras la crisis, los mamíferos seguían siendo pequeños animales nocturnos, de menos de diez kilos de peso, que se alimentaban de insectos y vegetales. En el capítulo que hablamos de su vida durante el Cretácico ya hablamos de que debieron aparecer en el periodo Jurásico y que, posiblemente, ya habían experimentando antes de la crisis K/T una cierta diversificación.

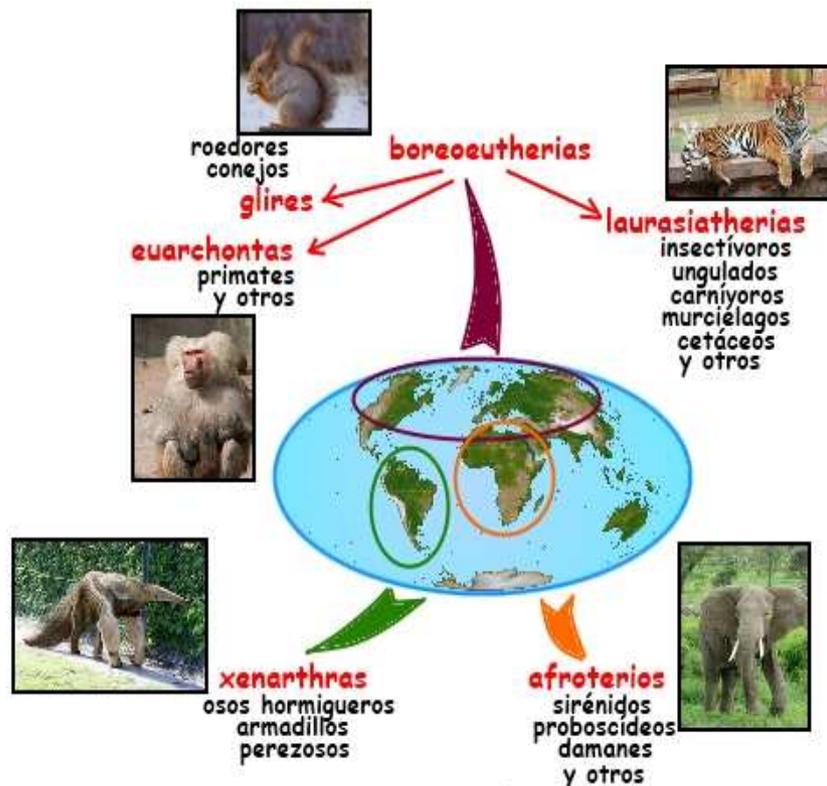


Reconstrucción del fenotipo del posible ancestro de los placentarios que pudo vivir durante el Paleoceno temprano (según el estudio⁽¹¹⁰⁾ mencionado en el texto, Maureen O'Leary et al., 2013)

No obstante también comentábamos allí que hay opiniones, como la de la bióloga Maureen A. O'Leary, que aseguran que la diversificación de los

mamíferos se produjo a partir de una única especie que logró sobrevivir a la extinción. En un estudio⁽¹¹⁰⁾ de esta bióloga se llega a proponer la morfología de este animal, que es la que aparece en la figura siguiente. Sin entrar en la controversia, sirva simplemente la mención para podernos hacer idea de cómo debían ser nuestros antepasados de hace unos 65 millones de años.

Sea cual sea la realidad del punto de inicio, en aquellos años fronterizos se estaba gestando en Laurasia, continente que agrupaba a los territorios del hemisferio norte, una gran familia de animales al abrigo de su condición de región aislada y separada de las australes: los **Boreoeutheria**, o “*animales del norte*”, que instauraban las bases de un buen número de órdenes mamíferos placentarios que más tarde se irradiarían por todo el planeta. Por un lado avanzaban en su evolución los *Laurasiatheria*, “*animales de Laurasia*”, que agrupaban a los carnívoros, los insectívoros, los ungulados o los murciélagos. Por otro, su familia hermana los *Euarchontoglires*, que agrupaba a los “glires”, roedores y lagomorfos (conejos y liebres) y a los “euarcontos” o “*ancestros verdaderos*”, suborden en la que sorprendentemente se refugian los primates.



Distribución geográfica de los inicios evolutivos de los mamíferos placentarios (Imágenes: Wikimedia, dominio público, GNU FDL 1.2 y CC BY-SA 2.0 Generic)

Se cree que el primer ancestro fósil conocido de estos últimos, los primates, corresponde a uno encontrado en Montana, Estados Unidos. Se trataría de los antiguos plesiadapiformes, de costumbres arborícolas. En particular se habla de *Purgatorius*, una especie de ratilla que correteaba hace casi 65 millones de años por el noreste americano. Aunque no hay constancia clara de la relación directa entre plesiadapiformes y primates, al haber una laguna fósil entre este animal y los modernos simios, los análisis genéticos parecen indicar que son filos hermanos. Recordemos que el filo es un nivel de clasificación taxonómica que tiene en cuenta el plan de organización corporal del animal.



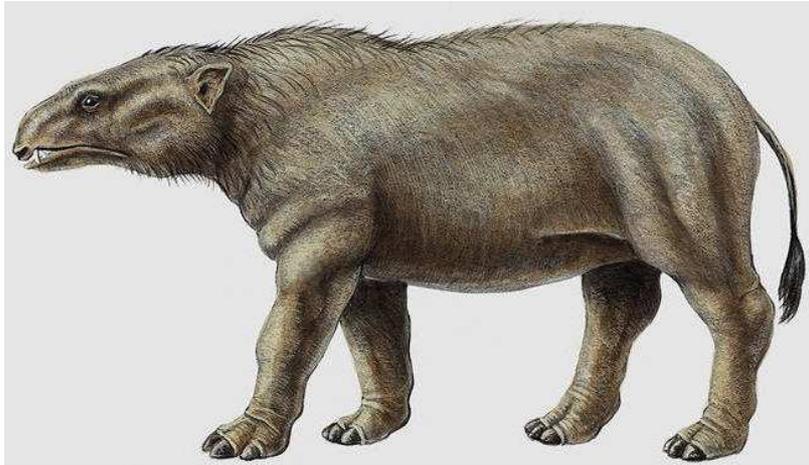
Recreación de Plesiadapis, un plesiadapiforme y de Purgatorius
(Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Mientras el *Plesiadapis* ocupaba gran parte de Europa y Norteamérica, e incluso Asia, como lo demuestran sus fósiles, los representantes más antiguos de los roedores se extendieron por América del Norte y ya presentaban la configuración mandibular típica de los actuales.

En paralelo a lo que sucedía en Laurasia, sobre la aislada África continuaba la evolución de los **Afrotheria**, los “*animales de África*” de donde procede un fósil de hace 56 millones de años que sería el ancestro común de elefantes y sirénidos, el *Phosphatherium*, un proboscideo herbívoro de hábitos anfibios.

Los afroterios manifiestan una gran diversidad evolutiva, ya que en este superorden podemos encontrar desde los grandes elefantes hasta los minúsculos damanes, desde animales acuáticos como dugones y manatíes hasta zapadores subterráneos como el topo dorado. Y aunque posiblemente no sea un dato relevante, merece la pena comentar por su curiosidad, o al menos así me lo parece, el que casi todos ellos presenten un hociconariz significativamente alargado. Hoy en día es bastante clara la cercana relación filogenética entre sus diversos grupos, gracias al estudio⁽¹¹¹⁾ de

múltiples fósiles de sus diversos taxones en los que se han tenido en cuenta no sólo sus características morfológicas sino también las genéticas.



Representación de un Phosphaterium (Wikia, CC BY-SA 3.0)

Un caso particular lo presenta la fauna de la isla de Madagascar, situada en aquellos momentos “navegando” entre África y la India. Hace 160 millones de años se habían separado estos dos últimos continentes. Setenta millones de años después, la placa de Madagascar se separaba definitivamente del subcontinente indio, quedando como la isla que es hoy en día. A lo largo de este proceso algunos animales de los dos territorios vecinos habían emigrado a Madagascar, en donde se produjo un proceso de evolución convergente propio que les llevaría a rellenar todos los posibles nichos gracias a morfologías y fisiologías muy semejantes a las conseguidas en la evolución de la fauna africana. Un caso paradigmático lo constituyen los lemures. Hace 62 millones de años se separaron en África de los otros primates, emigrando a Madagascar unos 8 millones de años después, en donde se diversificaron hasta las 50 especies actuales, todas ellas endémicas de este territorio. Esta gran isla contiene en la actualidad alrededor del 5% de todas las especies y plantas del planeta, de las que más del 80% no se encuentran en ningún otro lugar.

En el continente-isla sudamericano también se desarrolla su propia fauna, los **Xenarthra** o los animales de “*articulaciones insólitas*” en referencia a su especial estructura de vértebras lumbares. Nos estamos refiriendo a los actuales osos hormigueros, armadillos y perezosos. Es un orden que ha sido muy castigado por los avatares climáticos y geográficos, como veremos en una entrada posterior en donde hablaremos de la predación que sobre ellos ejerció la fauna del norte, recién llegada tras la unión del istmo de Panamá hace unos tres millones de años. De hecho viven hoy en día

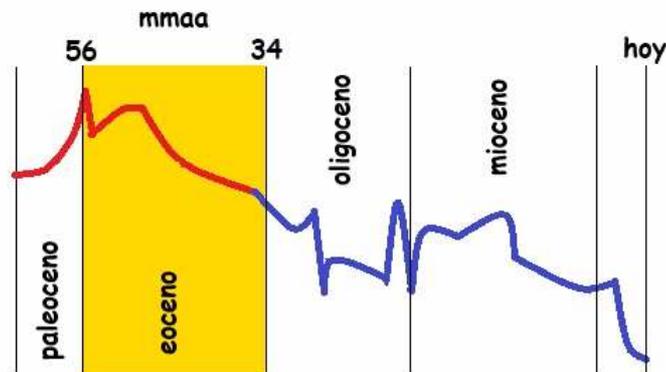
especímenes de doce géneros solamente, cuando el registro fósil habla de 208 ya extintos.

Llegamos por fin al final del Paleoceno. A lo largo de este capítulo hemos podido seguir las andaduras de la biosfera en su camino de recuperación tras el desastre del año 65 millones antes de hoy. La canoa de la Vida por fin ha logrado sortear las amenazadoras olas que rompían sobre la playa y la encontramos de nuevo navegando hacia su última singladura. En el capítulo que sigue recorreremos un largo periodo de más de 20 millones de años, el Eoceno.

48. El Eoceno

En el capítulo anterior conocimos las peripecias que la Vida tuvo que pasar para no sucumbir definitivamente. No sólo lo consiguió, sino que despedimos el capítulo contemplando cómo su barca surcaba de nuevo el mar con promesas de nuevos éxitos. Nos quedan 56 millones de años hasta el momento actual de punto y seguido.

“*Eo-ceno*“(zoico) significa “*el alba de la nueva vida*“. Muy sugerente, ya que por fin se ven como viables a las nuevas formas que poco a poco han ido surgiendo. Al igual que en la entrada anterior, comentamos aquí que hay⁽¹⁰⁴⁾ una estrecha relación entre el perfil climático y el perfil de diversidad de organismos vivos. Por eso reproducimos de nuevo nuestro habitual gráfico como inicio del viaje.



Poco a poco las corrientes oceánicas se habían ido modificando de acuerdo al movimiento de los continentes. Las nuevas posiciones relativas entre ellos fueron favoreciendo el enfriamiento general de la atmósfera que, como ya sabemos del capítulo titulado “*Comienza el Terciario*”, llevó, tras unos 20 millones de años, al recubrimiento con casquetes helados de la Antártida.

Mientras duraron los buenos momentos climáticos heredados del Paleoceno, las abundantes selvas húmedas siguieron siendo el paisaje más común. Las palmeras y los cactus habitaban Alaska y la Patagonia, mientras que las humildes plantas de flores compuestas dibujaban pequeñas manchas en los anteriores hábitats o junto a las corrientes de agua.

Como consecuencia del progresivo enfriamiento terrestre se estaba produciendo un cambio en las condiciones climáticas de las estaciones, de forma que fueron cada vez más contrastados los veranos y los inviernos. Esta circunstancia afectó a la familia vegetal de distinta manera, dependiendo de la capacidad de resistencia de cada especie en particular. Los árboles caducifolios, gracias a su vaivén estacional de cobertura foliar, estaban muy adaptados a los grandes cambios de temperatura, por lo que comenzaron a imponerse sobre las especies perennes tropicales, de forma que ya hace 38 millones de años aquellos tipos de bosques cubrían vastas regiones en los continentes septentrionales. Las junglas a las que iban sustituyendo solamente lograron resistir en el sur, sobre Sudamérica, India, y Australia. En latitudes todavía más extremas, como era la austral Antártida, que había sido un esplendor de bosques templados subtropicales, las tierras se cubrieron de grandes regiones de tundra junto a hielos perpetuos. Las zonas más estresadas eran progresivamente conquistadas por las plantas herbáceas de flores compuestas, comenzando así el esplendor de un nuevo biotopo como fueron las praderas.

En el subsuelo de estos entornos herbáceos bullía el mundo social de las hormigas, que estaban iniciando un despegue hacia nuevos hábitos y formas. Posiblemente los modernos biotopos favorecían su evolución. Es el momento en que comienzan⁽¹¹²⁾ en sus galerías una agricultura subterránea de bajo nivel sobre un amplio rango de hongos. Quizás esto último fue el valor diferencial que hizo que poco después, hace unos 50 millones de años, comenzara la radiación de sus formas más modernas que perduran hasta hoy en día. Ello les permitió ser los insectos dominantes durante muchos años.

Durante esta larga época de transición hacia el frío, y a pesar de que la generalidad de los mamíferos conservaban aún un pequeño tamaño, en el registro fósil ya se empiezan a encontrar evidencias de animales mayores y de morfologías modernas.

Éste era el caso de los primitivos **ungulados**, animales que caminan sobre la punta de los dedos enfundados con pezuñas. La categoría ungulado viene del latín “*ungula*”, que precisamente quiere decir pezuña. Por lo dicho en los párrafos anteriores se puede entender que el panorama comenzaba a ser el adecuado para los animales que vivían de ramonear las plantas, entre ellos nuestros ungulados, bonanza que les llevó a experimentar en esta época una deriva hacia la diversificación y su consolidación. Aparecen en Laurasia a partir del Paleoceno tardío como una radiación de los mamíferos *condilartros* que a su vez descendían de

animales insectívoros. El nombre de condilartro indica un gran avance estructural, ya que significa “*articulación en forma de condil*”, o de un hueso encajado en otro -como la rodilla-. En el Paleoceno los ungulados iniciaron su definitiva diversificación en dos familias que luego serían significativamente preponderantes: los *perisodáctilos* y los *artiodáctilos*. Para entendernos mejor, “*los que tenían una única pezuña*” en cada pata -léase caballos, tapires o rinocerontes- y “*los que tenían dos*” -léase camellos, rumiantes, cerdos, hipopótamos y sí, aunque parezca mentira, ballenas y delfines-. Ya desvelaremos el misterio.



ARTIODÁCTILO
 pata de dromedario
 dos pezuñas



PERISODÁCTILO
 pata de caballo
 una pezuña

Extremidades de los ungulados (Wikimedia, dominio público)

Los perisodáctilos habrían evolucionado a partir de un pequeño animal con aspecto de oveja, el *Phenacodontidae*, cuyas características anatómicas serán heredadas por sus futuros descendientes. Hace 55 millones de años ya se habían diversificado y extendido por varios continentes. En Norteamérica prosperaron los caballos, surgidos hace 54 millones de años, y los tapires, mientras que los rinocerontes parece ser que radiaron por primera vez en Asia, pasando más tarde a América a mediados del Eoceno. Estos caballos tempranos, cuyo primer fósil conocido corresponde a *Hyracotherium*, eran muy pequeños, del tamaño de un zorro, y aún tenían varios dedos en sus patas. Los rinocerontes también eran pequeños y aún no habían desarrollado su peculiar cuerno. Dada el corto periodo desde su diversificación, estos últimos se parecerían bastante al caballo o a un tapir de la época.

Por su parte los artiodáctilos provenían del condilartro *Arctocyonidae*, una pequeña pero fiera comadreja omnívora del Paleoceno. Sin embargo, los

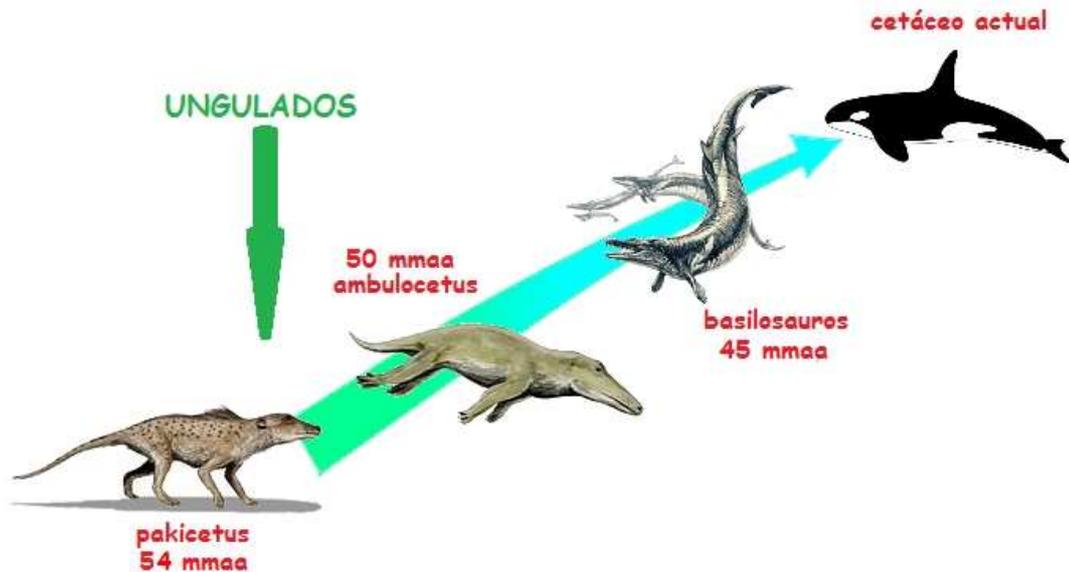
primeros artiodáctilos eran parecidos a los cerdos de hoy en día: animales pequeños de cortas patas que se alimentaban de las partes blandas de las plantas. Ocupaban por lo general hábitats marginales, como consecuencia de que se vieron superados por el mayor éxito de los perisodáctilos. Quizás por ello la evolución llevó a alguno de ellos a practicar estrategias adaptadas a la “miseria”: en esta época es cuando se desarrolló el sistema digestivo *rumiante*, “inventó” con el que sobrevivían gracias a que podían procesar alimentos de menor calidad.

También los artiodáctilos, hace unos 52 millones de años, fueron los sujetos de uno de los acontecimientos más importantes en el álbum familiar de los mamíferos. Sorprendentemente, o al menos a mí me lo parece, de una rama próxima a la de los hipopótamos se desprendió una nueva línea evolutiva que al cabo desembocaría en animales tan esencialmente marinos como lo son las ballenas, los delfines o cachalotes, es decir, el gran orden de los **cetáceos**.

Unos 325 millones de años antes de este acontecimiento, un pez había decidido salir del agua y fundar la familia de los tetrápodos. Ya lo vimos con profusión en el capítulo 32 de esta serie. La selección natural fue modelando a aquellos aventureros siguiendo un sinfín de rutas que les llevaron a través de la difícil tarea de la supervivencia. Una de ellas desembocó en los mamíferos terrestres, abriéndose más tarde la rama de los ungulados de pezuña partida. Se cree⁽¹¹³⁾ que uno de estos artiodáctilos, el pequeño *Indohyus*, pudo ser el eslabón perdido entre los mamíferos terrestres y los cetáceos. El proceso de retorno al agua de los mamíferos descendientes de este animal se inició en el actual Pakistán, en donde un evolucionado carnívoro terrestre, considerado como el primer espécimen del orden *Cetacea*, el *Pakicetidae*, comenzó a encontrar cómodo el relajar el esfuerzo que suponía mover su cuerpo metiéndose en el agua. Algo así como hacen los hipopótamos. De él hasta los basilosauridos, que ya fueron completamente marinos, pasaron poco más o menos 10 millones de años y una adaptación cada vez mayor a la comodidad del agua y al soporte hidrostático que les ofrecía. Se adaptaron sus oídos, los orificios respiratorios migraron hacia lo alto de la cabeza, las patas delanteras adoptaron la forma de remos, aunque manteniendo la vieja estructura ósea mamífera. Mientras, las extremidades posteriores fueron derivando hasta formar unas palas, que ya no estaban ancladas al cóccix, con las que se propulsaban en un movimiento ondulatorio vertical, semejante al galopar del mamífero terrestre corredor del que provenían.

Algunos cetáceos desarrollaron unas láminas córneas -barbas- en la boca que fueron sustituyendo a los dientes, novedad que les permitió colonizar un nuevo nicho de alimentación, el del abundante plancton.

Como veremos unos párrafos más abajo esos no fueron los únicos mamíferos que decidieron volver al mar.



Evolución de los cetáceos (a partir de imágenes de Wikimedia, GNU FDL 1.2)

En África también estaban evolucionando las selvas que se retiraban al ritmo de las bajadas de temperaturas, abriendo espacios a los pastizales en donde estaban prosperando los nuevos animales vegetarianos. Fue a mediados del Eoceno, y dentro de la gran familia de afroterios. Se trataban de unos animales que en principio se pensó que debían ser unos ungulados más. Hoy en día se tiene claro que no es así ya que se considera que son el resultado de un proceso evolutivo convergente por el que algunos animales africanos adoptaron hábitos y formas semejantes a los ungulados europeos. No en vano se les conoce como **penungulados**, o lo que es lo mismo, los “*casi ungulados*“. Se trata de los *proboscídeos* -elefantes, mamuts y demás narigudos, y también ¡asombroso! los acuáticos *sirénidos*, de los que hoy en día conocemos a los dugongos -de apodo las “*señoras del mar*“-, y los manatíes.

Hace ahora unos 50 millones de años algún tipo de herbívoro africano del clado penungulado inició su vuelta al mar abriendo la senda de los actuales sirénidos. En nuestro registro fósil se considera a *Pezosiren portelli* como el primer de ellos. Era aún un animal cuadrúpedo de costumbres anfibias. Hacia finales del Eoceno el orden sirenio había

prosperado ya que datados en esa época se han encontrado multitud de fósiles de manatíes que surcaban las aguas. Los sirénidos siguen siendo los únicos mamíferos marinos hervíboros, un recuerdo indeleble de sus inicios.

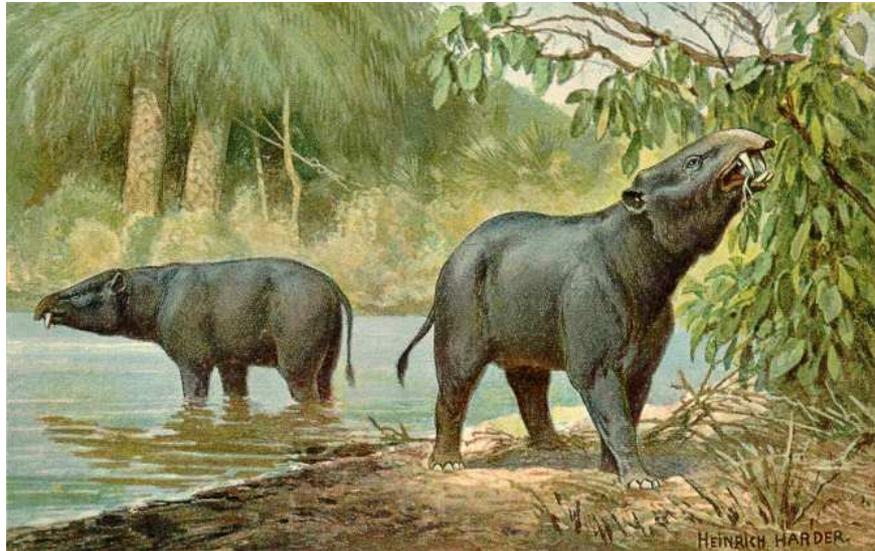


Imagen artística de Moeritherium, uno de los primeros antepasados directos de los elefantes (Wikimedia, dominio público)

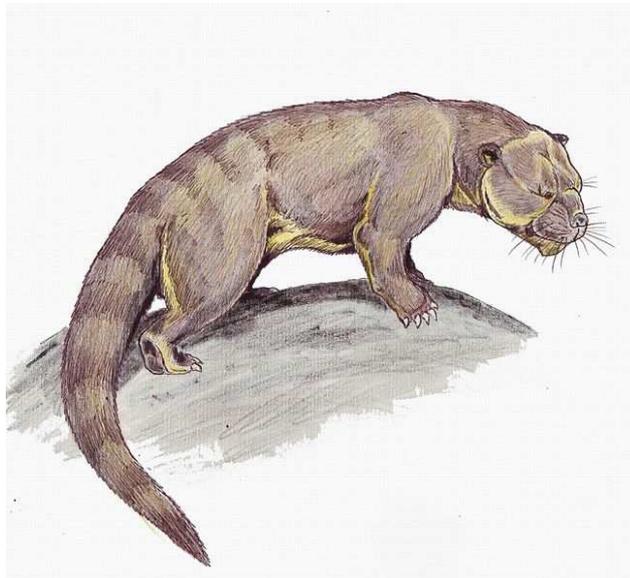
Los ancestros de los proboscídeos ya vivían durante los años frontera del Eoceno con la siguiente época, el Oligoceno, hace unos 35 millones de años. Se considera como el más ancestral a *Moeritherium*, que era un relativamente pequeño animal de menos de un metro de altura, con una pequeña trompa y atisbos de colmillos, y un cuerpo semejante al de los hipopótamos, posiblemente ya que ambos ocupaban nichos próximos a las aguas, en este caso del Nilo, consumiendo la vegetación de ribera.

Además de las dos aventuras comentadas más arriba acerca del regreso a las primitivas costumbres acuáticas protagonizadas por cetáceos y sirénidos, los mamíferos aún tenían que representar un tercer acto: el de los **pinípedos** -focas, morsas, lobos de mar...-. Pero eso sería bastante más tarde, hace ahora unos 25 millones de años, a finales de la próxima época, el Oligoceno. Debió suceder en latitudes australes ya que el fósil más antiguo de lo que parece ser fue un animal de transición, *Puijila Darwin*, se ha encontrado⁽¹¹⁴⁾ en la Antártida. Su aspecto externo sería como el de las nutrias actuales, lo que permite conjeturar que los pinípedos debieron pasar por una fase de agua dulce similar a la de aquellos animales.

Los primitivos cetáceos y sirénidos, tras su vuelta al mar, se encontraron con los tiburones que habían experimentado una gran diversificación. En algún caso hacia especies de gran tamaño, como el

Otodus obliquus, que podía alcanzar los nueve metros de longitud y que se alimentaba de mamíferos marinos, peces y de otros tiburones.

Volvamos a tierra. En esta época los **roedores**, que habían iniciado su andadura hace unos 75 millones de años, se extendieron por Laurasia, en donde a finales del Eoceno ya aparecen la mayoría de los grupos actuales. Entre otros, las ardillas, los castores, los ratones o los lirones. Desde este continente colonizaron más tarde África, en donde dieron lugar al poco tiempo a los Hystricognathi, los cuales consiguieron también en poco tiempo saltar a Sudamérica llevando a cabo la primera repoblación de este territorio por los roedores. En Perú hay evidencias fósiles⁽¹¹⁵⁾ de roedores datadas en hace 41 millones de años. Posiblemente lo hicieron sobre troncos flotantes, saltando de isla en isla en los relativamente estrechos canales que aún separaban ambos continentes, entre los que se encontraban el archipiélago de San Pedro y San Pablo. A partir de aquellos viajeros hystricognatos en el continente sudamericano radiaron los puercoespines, cobayas, capibaras,... Como deducimos de lo dicho, podemos asegurar que este orden placentario es uno de los grandes éxitos en la historia de los mamíferos. Más del 40% de las especies Mammalia son de roedores, y se dice que hay más roedores en el mundo que la suma de todos los mamíferos restantes.



*Imagen de Patriofelis ferox, uno de los primeros carnívoros del Eoceno
(Wikimedia, GNU FDL 1.2)*

También en esta época, hace unos 50 millones de años, los **carnívoros** iniciaron su diversificación, se cree que en Norteamérica, donde se han encontrado algunos fósiles en Texas formando dos familias: la de los

cánidos -perros, lobos, zorros...-, que incluyen también a los osos, y la de los *félidos* -tigres, leones, gatos...-.

Los primeros eran más móviles y acostumbraban a cazar con estrategias poco sofisticadas y más oportunistas. Los félidos, que inicialmente abundaron más en Europa, se mantuvieron en los bosques siguiendo costumbres semiarborícolas y fueron grandes cazadores a la emboscada. Ambos habían modificado su dentadura, de forma que disponían de unos caninos afilados preparados para sujetar a sus presas. Incluso podían ser tan largos como un sable. Las cúspides de sus molares estaban dispuestas en forma de triángulos invertidos que se alternaban en el cierre de las mandíbulas, formando así una serie de bordes cortantes zigzagueantes, como si fueran las cuchillas de unas tijeras, con los que cortaban la carne en porciones pequeñas.

Así, en esta época eocénica, de entre todos los carnívoros dominaron los *creodontos*, que precisamente significa “*dientes de carnicero*“. Eran animales de Laurasia y ya habían emigrado a África a principios del Eoceno, en donde desarrollaron tamaños tremendos, apropiados para la caza de los grandes proboscídeos. Más tarde, a principios del Mioceno, cuando África y Europa se habían juntado, hace unos 20 millones de años, recolonizarían su antigua patria, Eurasia.

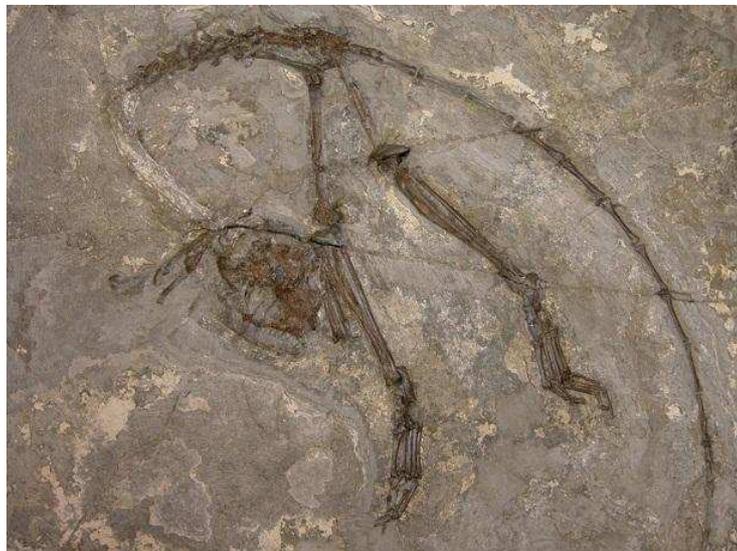


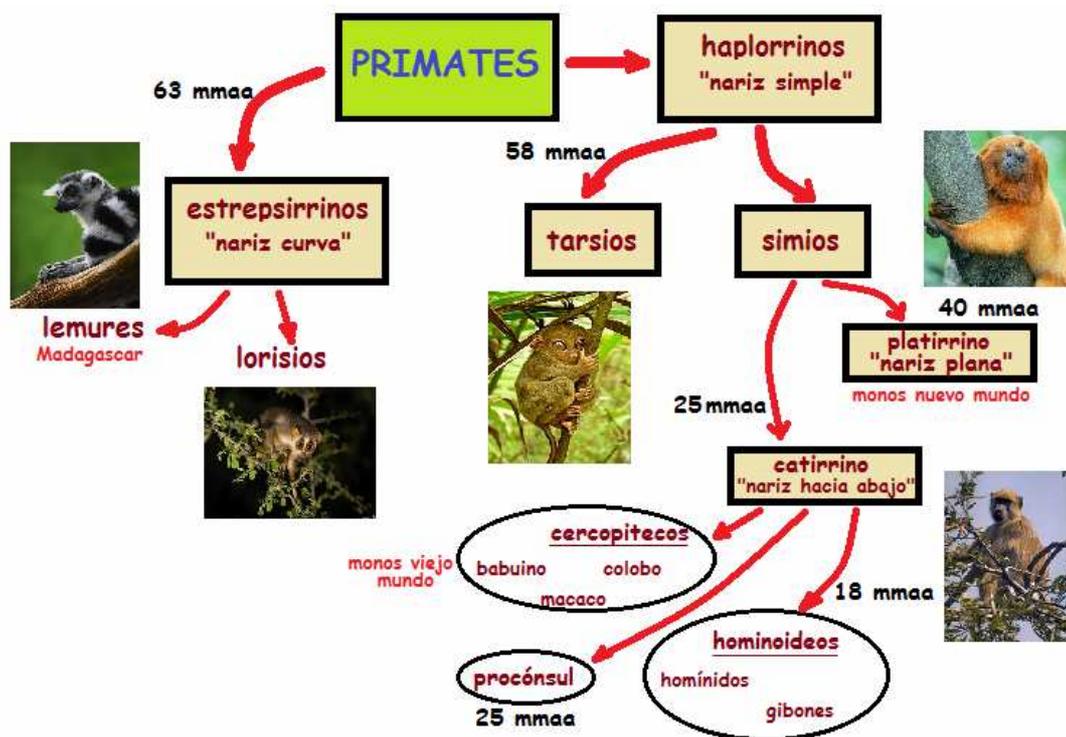
Imagen del fósil de Archicebus achilles descubierto en China. (imagen: Xijun Ni)

También fue una época de evolución para los **primates**, que tenían una estrecha relación de parentesco con aquellos arcaicos plesiadapiformes de Laurasia. El fósil más antiguo, de hace 55 millones de años, se ha

encontrado en lo que fue el lecho de un lago, hoy situado cerca del río Yangtze, en la actual provincia china de Hubei. Se trata de *Archicebus achilles* y corresponde a la rama filogenética de los *tarsios*, que apareció al poco tiempo de separarse esta rama de la de los antropoides.

Archicebus difiere absolutamente de cualquier primate conocido. Realmente tiene unos pies de mono, las extremidades y dientes de un primitivo primate y el cráneo asombrosamente pequeño, adecuado a su pequeño tamaño: unos 30 gramos cuando adulto.

Las primeras migraciones de los primates más ancestrales se produjeron entre los continentes boreales. Un estudio⁽¹¹⁶⁾ hecho público en 2006, basado en análisis isotópicos del carbono sobre fósiles del primate *Teilhardina*, parece asegurar que este animal se originó en Asia hace más de 50 millones de años, y que en un corto lapso de tiempo de 25 mil años migró primero a Europa y luego a Norteamérica.



Árbol filogenético de los primates, con la estimación de la época en que se desgaja cada rama. La datación temporal está sometida a discusión como el hecho de que algunos paleontólogos afirman que *Procónsul* sería el primer hominoideo

Y luego... ¿qué pasó? Realmente hay un vacío en el registro fósil entre estos antiguos animales del hemisferio norte y los primates más modernos,

cuyos antepasados se han hallado en Asia y África. Posiblemente una población inicial emigró al continente negro extinguiéndose con posterioridad de los territorios euroamericanos de partida como consecuencia de la “Gran Ruptura”, acontecimiento biogeológico del que hablaremos en un capítulo posterior. Ya en África, los emigrantes originaron más tarde la rama de los *simiformes*, produciéndose posteriormente su especiación -aparición de sus especies biológicas- en tres territorios muy separados: los sudamericanos Platirrinos, monos de “*nariz plana*” o “*monos del nuevo mundo*” hace unos 40 millones de años; los extintos asiáticos Eosímidos; y los africanos Catarrinos, los monos de “*nariz hacia abajo*” o “*monos del viejo mundo*”, 15 millones de años después.

Se ha estudiado el salto de los simios de África a Sudamérica siguiendo las secuencias mitocondriales, y parece ser que se produjo en un rango de entre hace 43 y 35 millones de años. De hecho el fósil sudamericano⁽¹¹⁷⁾ más antiguo conocido data de hace 35 millones de años y presenta más semblanzas filogenéticas con especies africanas del Eoceno que con fósiles más modernos de especies del propio continente. Debido a la deriva continental hacía poco que se había formado el océano Atlántico, por lo que aún no tenía el ancho actual y seguramente estaría lleno de islas recién creadas por la dorsal atlántica. Estas islas serían cada vez más abundantes como consecuencia del progresivo descenso del nivel del mar que iba siguiendo el ritmo de crecimiento de los hielos en la Antártida. Es probable que los primates atravesaran el océano Atlántico saltando de isla en isla hasta América del Sur. O bien haciendo “rafting”, de acuerdo a lo que dicen algunas investigaciones⁽¹¹⁸⁾ que sugieren que un primate pequeño de un kilogramo podría sobrevivir en una balsa de vegetación durante trece días. Teniendo en cuenta la velocidad del viento y las corrientes, pudo ser un tiempo suficiente como para realizar el viaje a través del canal que separaba a los dos continentes.

La migración al norte de los catarrinos desde África para colonizar de nuevo Europa y Asia se produjo mucho más tarde, alrededor de hace 20 millones de años.

Vamos a acabar el capítulo dedicado al Eoceno con el recurso que hemos empleado otras veces a lo largo de esta serie. Con una imagen que nos permitirá rememorar la aventura que hemos vivido. Las praderas avanzando, los ungulados aprovechando esta nueva oportunidad en Eurasia mientras que en África los afroterios vegetarianos hacían lo mismo. A su estela comenzaban a medrar los nuevos carnívoros, mientras que los

primates hacían sus primeros pinitos arbóreos. Los roedores ya mostraban con su expansión y afares viajeros las inquietudes que hoy suponemos en ellos. Los pájaros seguían creciendo en número y formas, mientras en el agua los peces teleósteos hacían lo mismo. Todo ello lo podemos imaginar al ver el siguiente paisaje ideado y dibujado por Alain Bénétteau.



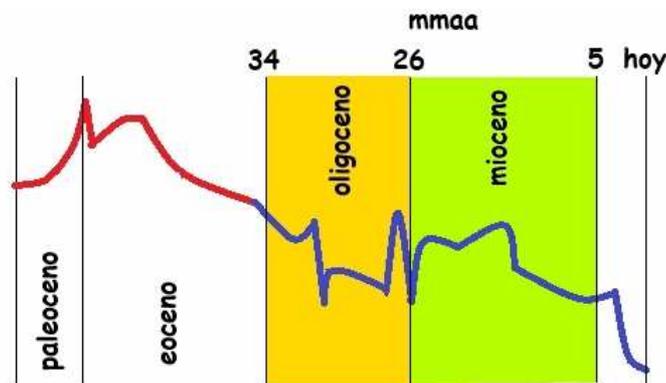
Paisaje del Eoceno ideado por el dibujante Alain Bénétteau

En esta imagen parece ya intuirse a la derecha unas nubes frías que amenazan nieve. El clima estaba realmente cambiando. En el capítulo siguiente continuaremos la historia atravesando momentos realmente gélidos. La vida se hace más dura, pero igual de irreductible que hasta ahora.

49. Oligoceno y Mioceno

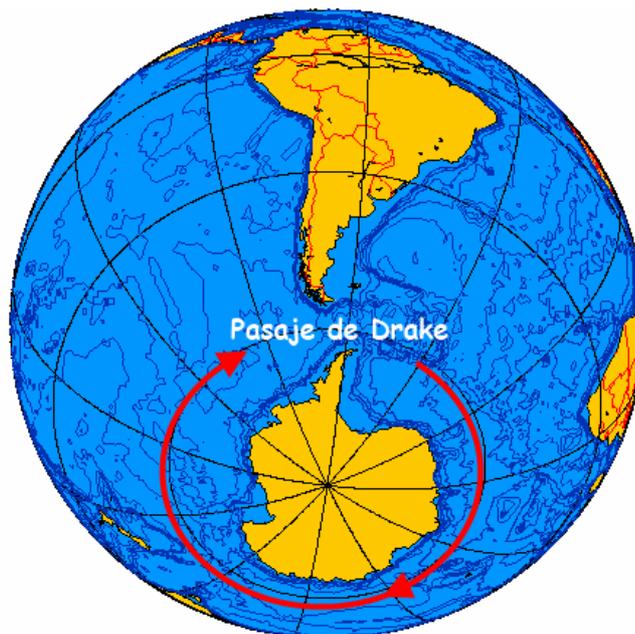
A través de los últimos capítulos hemos asistido a la hecatombe aniquiladora de finales del Cretácico, a cómo la Vida se fue reponiendo hasta llegar a una situación de nuevo equilibrio y de cómo esto debió ser el acicate para una nueva época de diversificación y enriquecimiento de formas. La “anécdota” se tomó su tiempo: 34 millones de años. Pero toda carrera conlleva un cierto agotamiento, y esto es lo que pasó en la nueva época que nos disponemos a explorar: el Oligoceno. Precisamente este nombre, “*Oligo-ceno(zoico)*”, quiere decir “*poca nueva vida*”. Como queriendo avisar: la capacidad inventiva se ha agotado. Y aún hubo más: la época que siguió se la nombró Mioceno, un intento de enfatizar aún más con un mensaje de “menos nueva(vida)” [*Mio-ceno(zoico)*]. Intuimos⁽¹⁰⁴⁾ claramente que la caída generalizada de la temperatura debió ser quien perfilaba el nivel de actividad de la biosfera.

Por eso vamos a utilizar de nuevo nuestro gráfico favorito para ubicarnos en el tiempo. Hemos entrado ya en regiones de un frío color azul.



El Oligoceno

Sabíamos por lo dicho en el capítulo 46 que titulamos como “*Comienza el Terciario*”, que aproximadamente un poco antes de iniciarse el Oligoceno, en el sur, la Antártida se estaba separando de Sudamérica, dejando abierto lo que hoy conocemos como el Pasaje de Drake. Poco antes lo había hecho de Australia, por lo que quedó completamente abierta una franja circumpolar de mar.



*Proyección ortográfica hemisférica centrada en el actual Pasaje de Drake
(Wikimedia, dominio público)*

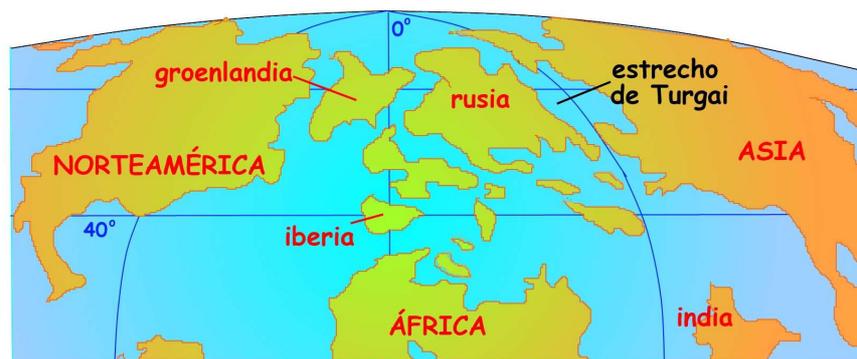
Ello permitió que las corrientes marinas pudieran cerrar su recorrido circular aislando al continente antártico, que ya no pudo atemperar con las corrientes que descendían desde el trópico las temperaturas frías del invierno polar, comenzando a cubrirse con un casquete de hielo. La consecuencia fue un enfriamiento global del planeta debida al menos a un doble motivo: Por un lado, el mayor frío de la Antártida incrementó el efecto sumidero del calor solar recogido en latitudes más bajas -en este caso más al norte-, por lo que se alteraron la circulación atmosférica y las corrientes termohalinas marinas que repartían por el planeta el frío del sur; y por el otro, por una causa que ya vimos en su momento: el hielo tiene mayor albedo, por lo que refleja más energía solar al espacio, reduciendo la temperatura. El consiguiente enfriamiento de las aguas provocó el que muchas especies que habitaban aguas cálidas desaparecieran, dando lugar a una fauna muy pobremente diversificada.

Durante esta época fría continuó la regresión de los bosques tropicales de la franja ecuatorial, en donde fueron sustituidos por árboles menos sensibles a los cambios de temperatura, y se consolidó la expansión definitiva de los pastizales por América, Europa, Asia y África. El éxito de las *herbáceas* estribaba en que su crecimiento era constante, no paraba, lo que le permitía invadir con gran éxito nuevas tierras interiores partiendo de sus orígenes en las riberas de las corrientes de agua. Una vez conseguida la especial simbiosis con los animales pacedores -los comedores de pastos-

que con la ingestión eliminaban las plantas competidoras y a la vez ayudaban a esparcir sus semillas a través de los excrementos, las plantas herbáceas se diseminaron sobre inmensas extensiones de territorio para formar las praderas.

Es evidente que el clima estaba jugando con los habitantes del planeta. Pero no toda la presión evolutiva del momento debe ser achacada a esta circunstancia.

Hace 34 millones de años se produjo lo que se conoce en el territorio europeo como la “*Gran Ruptura*”, o como el “*Remodelado Mongol*” en el asiático. Está conceptualizado como un episodio más de extinción de especies, mucho menos grave que las cinco que ya conocemos de anteriores capítulos, aunque realmente se trató de una reconfiguración en la fauna europea. La “*Gran Ruptura*” se caracteriza por el cambio en las poblaciones de diversas especies provocado principalmente por dos circunstancias relacionadas con el estrecho de Turgai.

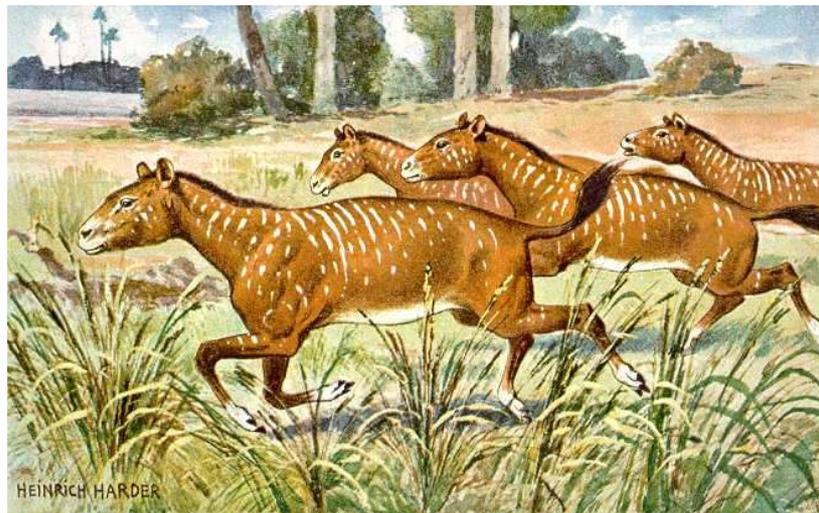


Configuración de los territorios europeos durante el Eoceno. El estrecho de Turgai se cerró en la frontera con el Oligoceno

En el mapa anterior podemos ver la situación de este estrecho en una época anterior a la que estamos estudiando. No importa el año exacto, pero aproximadamente representa la distribución geográfica de territorios hace unos 55 millones de años. Turgai dividía y fragmentaba la franja de tierras entre lo que actualmente son Europa y Asia, dejando una serie de pequeños enclaves que se iban modificando con el tiempo. Esta situación geográfica se mantuvo hasta inicios del Oligoceno, hace 34 millones de años, que es cuando se unen definitivamente los dos continentes desapareciendo la configuración de archipiélagos dominante hasta entonces. Durante las fases iniciales de desmembración y configuración cambiante, las pequeñas poblaciones que quedaban aisladas e incomunicadas entre ellas

experimentaban procesos de nueva especiación -por el que se generan nuevas especies a partir de otras-.

Así que el caldo de cultivo era muy variado cuando se unieron los dos continentes tras el cierre definitivo del estrecho de Turgai. Esto último permitió que las migraciones de animales entre ambos territorios fueran masivas. Gracias a todo ello los mamíferos sufrieron una gran renovación, siendo este periodo de absoluta transición entre las formas antiguas y las nuevas. Las familias endémicas de Europa fueron sustituidas por inmigrantes asiáticas, extinguiéndose así más de la mitad de los mamíferos europeos, como sucedió con sus primates, y afectando de este modo al resto de la flora y fauna. La familia del caballo desapareció de Eurasia, aunque se mantuvo firme en Norteamérica. Por contra, aparecieron por primera vez nuevas familias como la de los erizos o la de los rinocerontes modernos. Mientras, en el resto de órdenes europeos, roedores y ungulados, cambiaron sus especies dominantes, algo similar a lo que sucedería mucho más tarde en América con la aparición del istmo de Panamá.



Mesohippus bairdi, un caballo norteamericano de hace 40 millones de años, tridáctilo y de 55 centímetros de alto (Wikimedia, dominio público)

En este entorno de modificaciones de hábitats y de extensión de los herbazales, los ungulados de doble pezuña llegaron a ser la especie herbívora de tamaño medio más abundante. Ya sabemos de lo dicho en el capítulo anterior, que en el Eoceno algunos habían desarrollado el *rumen*, un estómago complejo, situado en el tracto digestivo anterior, que ayudaba en la digestión de la celulosa. Eso era así gracias a que en él se encontraban numerosos microorganismos anaeróbicos que pre-digerían esa biomolécula,

transformándola en azúcares asimilables por los rumiantes. De allí lo regurgitaban de nuevo a la boca donde acababa la masticación. Esto supuso para estos animales una gran ventaja que les permitía optimizar el uso de una dieta fibrosa, cosa que se iba haciendo cada vez más importante a medida que el mundo siguió haciéndose más seco y frío.

En Sudamérica, que estaba físicamente separada del resto de las tierras, durante el Eoceno evolucionó una fauna muy exclusiva de este continente, entre la que se encontraban marsupiales, ungulados y los famosos Xenartros, que incluyen a los osos hormigueros, armadillos y perezosos. Muchas de esas criaturas constituyen un claro caso de evolución convergente, ya que prácticamente su diversificación fue similar a la de la fauna mamífera de otros continentes: en nichos semejantes de territorios distintos evolucionaron de forma totalmente independiente fenotipos animales también semejantes. Es curioso el constatar que la fauna inicial de Sudamérica es muy parecida a la de Australia, y esto es debido a que durante muchos millones de años la Antártida hizo de puente entre ambos continentes.



Xenartros, típica fauna sudamericana (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

No podemos olvidar aquí lo adelantado en el capítulo anterior referente a cómo hace unos 25 millones de años, en latitudes australes, se consumó el tercer retorno mamífero al agua, cuando unos carnívoros con la forma y

costumbres de una nutria iniciaron el camino de los pinípedos: focas, morsas, lobos de mar...

En resumen, el fin del Oligoceno nos deja una imagen nueva del planeta, en donde los cambios climáticos están induciendo también modificaciones en la distribución de los vegetales: los grandes ejemplares de plantas parecen huir de las latitudes altas para refugiarse en zonas más templadas. En el proceso comenzaron a triunfar las plantas herbáceas, circunstancia que aprovecharon los ungulados para consolidar su expansión. Fue una época que podríamos definir casi como de continuista en todos los biotopos, durante la cual se produjo un importante baile de especies apareciendo ya las más modernas en un marco de estabilidad en los planes generales de organización de las formas corporales.

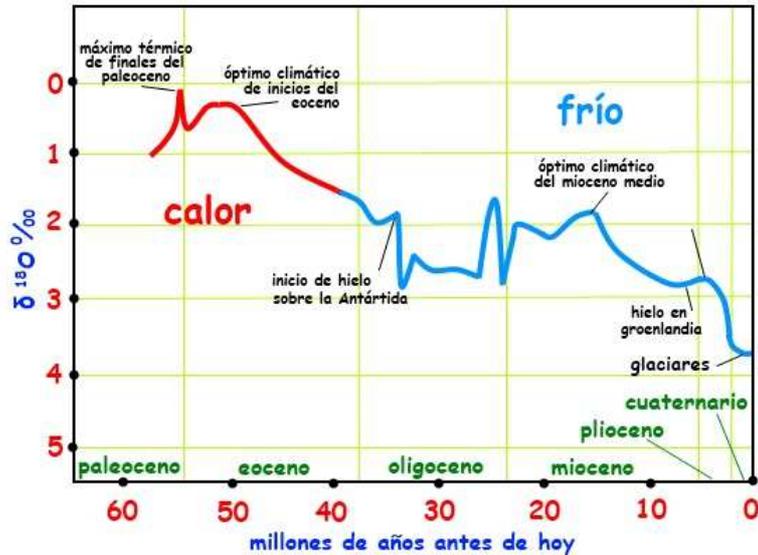
El Mioceno. Año 26 millones antes de hoy

Nos encontramos ahora en las puertas de la siguiente época, el Mioceno. La idea general es la que comentamos al inicio de esta entrada: La palabra “*Mioceno*” significa, en pocas palabras y tal como ya se dijo al inicio de este capítulo, que esta época no fue muy generosa en la generación de nuevos fenotipos animales.

En aquellos momentos los continentes australes seguían una deriva norte. La India continuaba presionando sobre Asia, lo que levantaba el Himalaya y la meseta tibetana. África por fin choca con Europa, elevando la cadena de montañas alpinas desde el Atlas hasta el Cáucaso, e incluso las cordilleras irano-iraquíes más al este. Sudamérica aún no había llegado a unirse con su continente hermano del norte, aunque la presión producida por la colisión entre su borde oeste y la placa pacífica estaba conformando a los Andes. Al sur, la Antártida quedaba cada vez más aislada por los mares circumpolares y cubierta de hielos. Las temperaturas, que experimentaron un cierto incremento hace 25 millones de años, vuelven a la senda descendente, de forma que comienza a acumularse hielo en altas latitudes del hemisferio norte como en Groenlandia, favorecido además, como sabemos de un anterior capítulo, por el progresivo cerramiento del “istmo de Panamá”.

La tendencia climática general en el planeta fue hacia una creciente aridez, ya que el enfriamiento global de la atmósfera hizo que disminuyera su capacidad para retener la humedad. Las consecuencias para el mundo vegetal fueron evidentes, puesto que desaparecieron los bosques húmedos, entre otros los del este de África. En aquellos momentos se elevaba la zona

ecuato-oriental de este continente, subiendo su nivel sobre el del mar. Las causas eran las fuerzas geológicas que abrían el rift africano acompañado de un importante vulcanismo que formó tremendas montañas de más de 5.000 metros de altura como el monte Kenia, el Stanley o el Kilimanjaro.



Como veremos en capítulos posteriores, ambas circunstancias, aridez climática y elevación geológica del terreno, fueron esenciales en el camino hacia la bipedestación de los simios. Al retirarse los bosques las praderas siguieron extendiéndose, debido a su mayor capacidad de recuperación tras una sequía, de forma que a esta época se le puede llamar también la “*edad de las hierbas*”, que continuaron apoyadas en la coevolución con los grandes herbívoros como los rumiantes. Las herbáceas jugaban con ventaja, ya que sus organismos apenas precisan lignina, lo que las hace virtualmente plantas sin leña -aunque algunas especies sí tienen tallos fibrosos y mineralizados- y que por su pequeño talle se sustentan gracias a la presión hidrostática en el interior de sus células. La mayoría de estas plantas son gramíneas, las cuales suelen desarrollar una modalidad de fotosíntesis en donde interviene para la fijación del CO₂ una molécula con cuatro átomos de carbono. Por eso se las llama plantas C4 en contraposición a las C3, que son el resto. Estas últimas viven perfectamente cuando las condiciones de humedad y temperatura son buenas, aunque no soportan bien bajas concentraciones atmosféricas de CO₂, cosa que sí hacen las plantas C4. Estas circunstancias comenzaron a ser las que realmente existían a partir de hace unos 30 millones de años. De ahí la gran expansión de las gramíneas en las llanuras centrales norteamericanas, asiáticas y de África durante este periodo, las cuales iban ocupando los nichos ecológicos de donde se retiraban los bosques

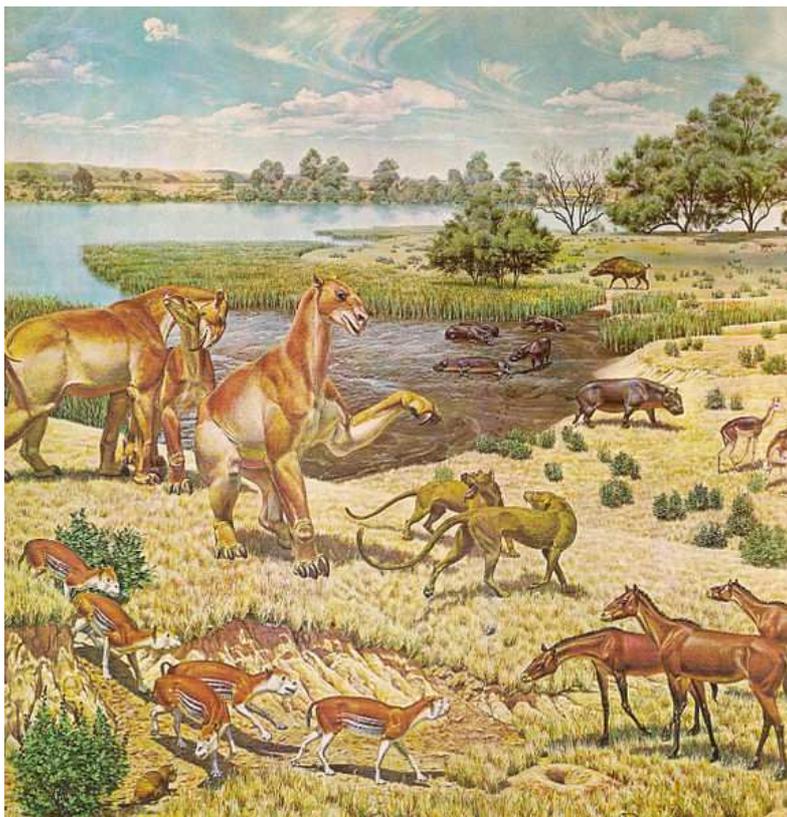
húmedos tropicales castigados por un clima cada vez más frío y seco. Un *biotopo favorable* combinado con su *simpleza estructural* que les permite un crecimiento muy rápido, reforzado todo ello por una eficiente *estrategia de fecundación* y dispersión de sus semillas, como es característica de las plantas de flores compuestas, y acompañado por una exitosa *asociación con los animales herbívoros* junto a los que iban evolucionando, todo ello confirió a las herbáceas el tremendo éxito que tuvieron en sus inicios.

Tanto la fauna marina de la época como la continental presentaban ya un aspecto moderno, de forma que a finales del Mioceno se podían encontrar todas o casi todas las familias actuales. El gran éxito y avance de las gramíneas, plantas ideales como forraje, contribuyó al auge de los animales herbívoros existentes, que vivieron un momento de esplendor: caballos, rumiantes, rinocerontes, elefantes... se fueron diversificando para ir decayendo a partir de finales de la época hasta la situación actual.

También fue notable el auge de animales considerados menores como las ranas, serpientes, roedores o paseriformes. Aparecen en Norteamérica los modernos osos hace unos 20 millones de años a partir de animales del género extinto *Ursavus*, que habitaban en Asia y que emigraron hacia América por el estrecho de Bering a mediados del Mioceno. Mientras, los marsupiales se retiraron definitivamente del hemisferio norte, quedando desde entonces definitivamente ubicados en Sudamérica y Australia.

Después de lo leído hasta ahora dejemos volar de nuevo la imaginación contemplando lo que bien puede parecerse a un antiguo paisaje del Mioceno. La hora: mediodía. En la figuración siguiente se puede apreciar el triunfo de las herbáceas. La panorámica claramente transmite la sensación de un clima cálido y seco, a pesar del inmenso río que transcurre plácido por el fondo alimentando con su humedad a grandes angiospermas.

Al fondo, un solitario *Daeodon*, el “cerdo terrible”, un artiodáctilo de gran tamaño que pesaba casi una tonelada. Posiblemente andaba buscando algún resto óseo para extraer la médula con sus potentes dientes. En el agua, una familia de *Lartetotherium* combatiendo el calor y las picaduras de los insectos en el fango de la ribera. Uno de ellos ha salido a comer la hierba de la pradera, alimento predilecto de este ungulado de pezuña única, más parecido a un hipopótamo que a un rinoceronte, que es lo que realmente es. Junto a él, unos tranquilos *Megatylopus*, unos camellos de tamaño medio, ya que pesaban entre 100 y 200 kilos, que con su largo cuello ramoneaban las hojas de los árboles, a medio camino de ser una jirafa.



Representación de un posible paisaje norteamericano de hace 15 millones de años. El clima, aunque frío y seco, no lo era tanto como hoy en día (Mural del Instituto Smithsonian, Washington, Wikipedia, dominio público)

En primer plano domina una pareja de gigantes *Indriocotheriinae* con su cría. No saben estos rinocerontes ancestrales que son unos de los mamíferos terrestres más grandes que han existido y que van a existir, mayores que un mamut, con sus casi seis metros de alto y 20 toneladas de peso. Les había costado mucho conseguir al pequeño, casi dos años de gestación y un año de lactancia para después pasar a comer hojas que arrancaban de los árboles con sus dos incisivos superiores, de ahí el cariñoso cuidado que se aprecia. Tremendos, pero inofensivos. Por eso sólo despiertan un aviso, más bien fruto de la prevención, de la pareja de valientes *Hesperocyoninae*, unos cánidos que debieron ser de los primeros que surgieron y se diversificaron en Norteamérica.

En primer plano una jauría de *Borophagus*, otros cánidos carnívoros que depredaban équidos, roedores y otras presas de pequeño tamaño. En este caso van a por los *Miohippus* de la derecha. Debían volver de una cacería, ahítos, ya que el primer encuentro con los pequeños caballos no parece amenazador. Un joven cánido de la jauría se entretiene ante la vista de un

Cynomys, ancestro del perrillo de las praderas que, en un momento de despiste, se ha alejado de su madriguera arriesgando gravemente su piel.

Dejemos nuestra plácida crónica para continuar el viaje por la historia, ya casi moderna, de la biosfera.

En esta época, el Mioceno, hubo una gran expansión evolutiva de los simios, que llegaron a sumar unas cien especies en todo el mundo. Ya conocíamos a los *catarrinos* de África, entre los que se cree que pudiera encontrarse por primera vez alguna característica antropomórfica, y a sus emigrantes transformados en *platirrininos* sudamericanos. Hace unos 20 millones de años se produce un nuevo éxodo, ahora a la inversa, en la que vuelven los monos catarrinos a Asia una vez que África y Europa se unieran geográficamente por Arabia. Los miembros de esta migración se extendieron sobre gran parte del territorio, variando mucho en tamaño, dieta y anatomía, formando diversas familias de las que se han encontrado fósiles tanto en Europa como en Pakistán y en China. La riqueza de la diversidad de estos primates catarrinos en Eurasia se debió a que el clima, más benigno durante esta época antes del descenso definitivo de las temperaturas, permitía que los bosques que sustentaban y cobijaban a estos animales estuvieran por entonces muy extendidos en aquel continente.



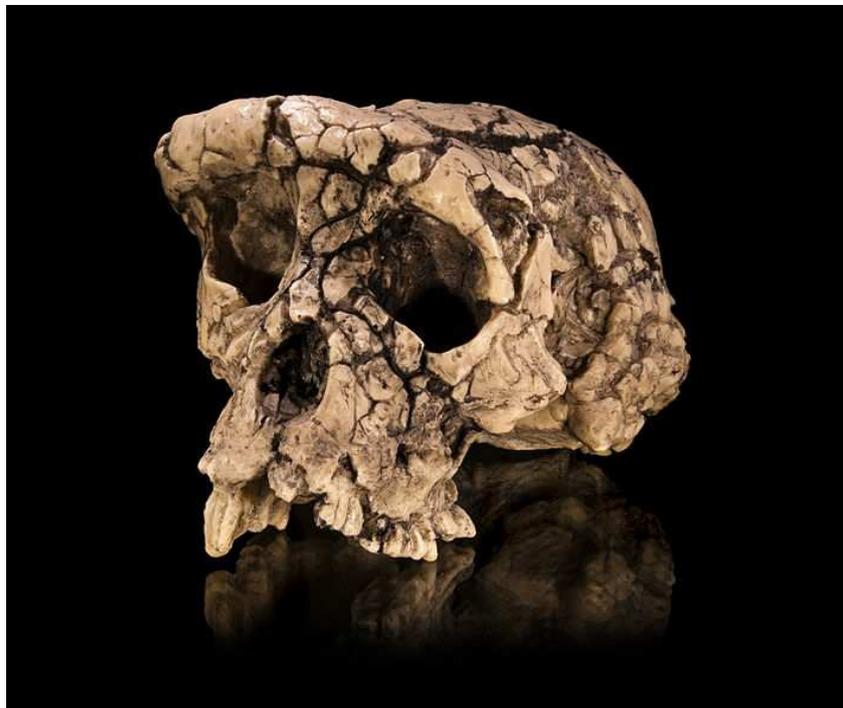
Migraciones de los Hominoideos según datos⁽¹¹⁹⁾ filogenéticos y estudios de la bióloga Caro-Beth Stewarty y el antropólogo Todd R Disotell (ver más abajo)

Y la misma benignidad de las temperaturas hizo que tuviera lugar hace unos 18 millones de años, probablemente en Asia, el inicio de la familia de

los *hominoideos*, de los que aún a día de hoy mantienen allí como representantes a los orangutanes y gibones.

Los miembros de la nueva familia de primates hominoideos tienen como característica particular, que los diferencia del resto de los monos, el que no tienen cola. Se cree que perdieron este apéndice o, mejor, lo redujeron formando el cóccix, fusionando las vértebras de la cola residual al adoptar el bipedismo como otra modalidad de marcha, complementaria a la habitual locomoción arbórea por braquiación -colgado de las ramas por los brazos-. A dos patas, una cola resultaba un gran inconveniente para su movilidad. Los individuos sin ella debieron tener una cierta ventaja evolutiva.

Y de nuevo una nueva emigración hacia el sur. Hace unos diez millones de años una población de estos últimos hominoideos asiáticos usaron posiblemente de nuevo a Arabia como puente para regresar a su África original. Algunos paleontólogos afinan más la historia, ya que según ellos el estudio del registro fósil sugiere que los humanos y los grandes simios actuales descienden de dos antiguos linajes de hominoideos de Eurasia: el asiático *Sivapithecus*, antecesor de los *orangutanes*, y el europeo *Dryopithecus*, que lo es de los gorilas, chimpancés y homos.



Cráneo de Sahelanthropus tchadensis, fósil de uno de los primeros homínidos que se conocen (6 a 7 millones de años) encontrado en el Chad (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

A partir de estos últimos inmigrantes, una vez llegados al continente africano, se desarrollaron los modernos homínidos: los *gorilas*, que se separaron de la rama hace unos 9 millones de años, los *chimpancés* conjuntamente con los *bonobos*, que lo hicieron hace unos seis, y finalmente los *homos*. La escasa evidencia fósil no permite asegurar qué tipo de mono o monos contribuyeron a la moderna familia homínida, aunque la evidencia molecular indica que estos pioneros vivieron entre hace 15 y 12 millones de años. El homínido fósil más antiguo encontrado hasta la fecha, un cráneo de *Sahelanthropus tchadensis*, se descubrió al norte de África y data de hace entre 6 y 7 millones de años.

Parece un poco complicada esta aventura de idas y venidas que los simios catarrinos y hominoideos realizaron entre Asia y África. Sin embargo ésta es la historia que proponen la bióloga Caro-Beth Stewart y el antropólogo Todd R. Disotell, que afirman en uno de sus estudios⁽¹¹⁹⁾ (1998) que la hipótesis de los orígenes asiáticos de los hominoideos sería la más plausible, es decir, la más fácilmente explicable a la luz de los fósiles conocidos, y por tanto la más probable, más que la hipótesis asumida durante mucho tiempo por los científicos que pivotaba sobre el origen africano de los hominoideos.

La opinión⁽¹²⁰⁾ del profesor en antropología de la Universidad de Toronto David R. Begun, una primera autoridad mundial en esta materia, refuerza la tesis. Él piensa que el importante cuerpo de evidencias fósiles acumuladas en los últimos años indica sin lugar a dudas el que la patria chica de los grandes simios y de los humanos fue Eurasia a pesar de que los primeros simios catarrinos aparecieran por primera vez en África.

Pero, como todo en el camino del conocimiento científico, no debe extrañar que este tema siga estando sometido a estudio, discusión y variadas opiniones. Y como botón de muestra lo que sigue, una variante más, ya que también hay expertos que apuestan por mantener *un origen anterior* y en África, al considerar ya a los individuos del género *Proconsul* como los más antiguos representantes de los hominoideos. Se le considera un antropoide muy primitivo, que ya presentaban rasgos de los hominoideos como la ausencia de cola o tener el pulgar opuesto a los otros dedos, pero manteniendo aún algunos atributos primitivos de los monos y que eran ya del tamaño de un gorila hembra. El *Proconsul* vivió antes de la separación del linaje de los gibones, en un periodo estimado entre hace 25 y 15 millones de años.

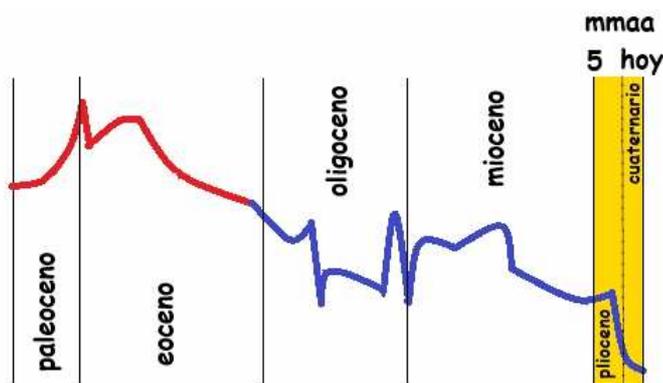
Mientras la historia de los primates tejía y destejía su destino, el continente sudamericano se aproximaba a su hermano del hemisferio septentrional. Cada vez había más islas entre los dos territorios, posiblemente de carácter volcánico consecuencia de la presión entre las placas. Se estaba creando una pasarela por la que la fauna traspasaba de un lado a otro sus genotipos. Los primeros intercambios entre las dos américas se produjeron hace 9 millones de años, cuando algunos carnívoros caninos del norte dieron el salto con un efecto devastador sobre los animales autóctonos del sur. Este puente de islas también permitió el cruce de roedores, megaterios -un tipo de perezosos terrestres ya extintos- y aves del terror -también desaparecidas- desde Sudamérica hacia Norteamérica y las modernas Antillas, casi dos millones de años antes de la formación de Centroamérica.

Y esto es lo que estudiaremos en el siguiente capítulo, tras cerrar el periodo Mioceno en fechas de hace 5 millones de años.

50. Los últimos 5 millones de años

En el capítulo que antecede vimos cómo el proceso de riqueza en la diversificación de plantas y animales iba ralentizándose en lo que parecía una transformación⁽¹⁰⁴⁾ condicionada en gran medida por el enfriamiento global del planeta. Las épocas de la “*poca vida nueva*” seguida de la “*aún menos vida nueva*”, Oligoceno y Mioceno respectivamente, nos han dejado al toro en posición para culminar el último tercio taurino que sentimentalmente apreciamos como “el nuestro”. Vislumbramos el final del túnel de esta biografía, ya que nos quedan tan sólo contemplar los últimos 5 millones de años de la existencia de nuestro planeta, un poco más del 1% de nuestros anales. A esto nos dedicaremos empezando con el presente capítulo.

Comienzan por tanto los últimos cinco millones de esta larga historia de la Vida, que se desarrollaran a caballo casi al 50/50 entre la última época del Terciario, el Plioceno, y el Cuaternario. Como colofón de nuestras inquietudes etimológicas, acabaremos diciendo que el significado de *Plioceno* es algo así como “*continuidad en la(s) formas de la nueva vida*”, Plio-ceno(zoico).



Se inicia esta época final con un repunte de las temperaturas, que subieron posiblemente unos 3°C, repunte que hizo disminuir los hielos sobre las tierras y elevar el mar unos 60 metros. Los perfiles continentales eran semejantes a los actuales, quizás desenfocados unos cien o doscientos kilómetros con respecto a los contornos de hoy.

La recuperación de las temperaturas hace que por última vez en su historia la Antártida se viera de nuevo libre de hielo, desarrollando por última vez una vegetación que formaban bosques de angiospermas semejantes a las hayas.

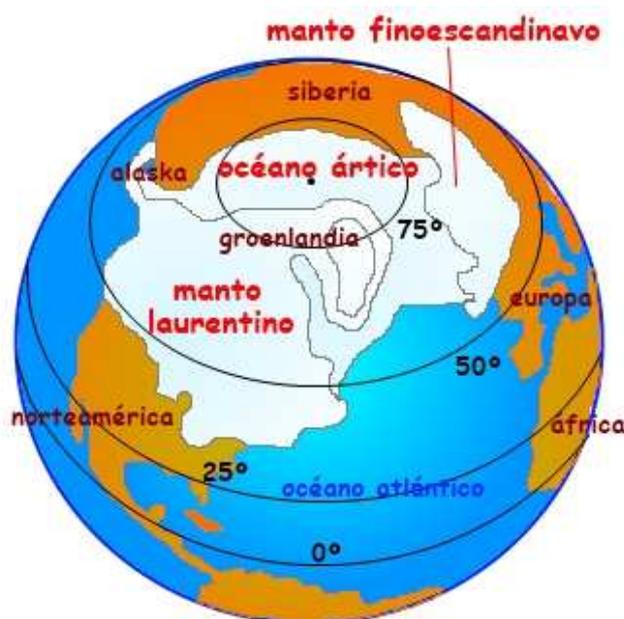
Pero hace tres millones de años aproximadamente se cerró definitivamente el istmo de Panamá, lo que lógicamente cambió la configuración de las corrientes oceánicas. Estos cambios en los flujos de la circulación termohalina facilitaron el enfriamiento del Ártico, que se cubrió de hielo favoreciendo un nuevo clima global “nevera”, a la vez que ayudaron a la recuperación de los casquetes helados en la Antártida. Estos procesos geológico-climáticos ya se comentaron con un poco más de detalle en un capítulo anterior que llamé “*Comienza el Terciario*”.

La consecuencia es que hace 2,5 millones de años las temperaturas iniciaron una senda de franca regresión hacia el frío. Como un inciso, diremos que las fechas coinciden con la aparición del género *Homo*. Los procesos que habían condicionado la evolución y distribución de las plantas en los últimos millones de años, que ya conocemos de anteriores entradas, reiniciaron su andadura. El clima frío y seco, con estacionalidades muy marcadas, volvió a premiar a las angiospermas caducifolia. Las coníferas también se las arreglaron bien, aunque sin poder soportar el ambiente extremo de las latitudes altas, por lo que tras el paréntesis de inicio de este periodo volvieron a ceder sitio a la tundra que se extendía sobre el permafrost, la capa permanentemente congelada en los niveles superficiales del suelo de las regiones muy frías. Las praderas siguieron prosperando y se diseminaron por todos los continentes a excepción de la helada Antártida. Los bosques tropicales fueron arrinconados en una franja ecuatorial cada vez más estrecha. El clima de África se hizo más árido, posiblemente debido al enfriamiento del océano Atlántico y a la elevación del propio continente africano por causas relacionadas con la progresiva apertura del Gran Valle del Rift. Todo ello dificultaba la entrada de aire húmedo por el oeste del continente, lo que al final hizo que aparecieran en África zonas desérticas y grandes superficies de sabanas.

En el último millón de años las latitudes más elevadas del planeta se cubrieron con extensos mantos de hielo, especialmente en el hemisferio Norte. Se estima que durante la máxima extensión del periodo glacial quedó ocupada por la capa de hielos una extensión equivalente al 30% de la superficie de las tierras emergidas de la actualidad. A lo largo de este periodo de intermitentes fluctuaciones climáticas se vivieron hasta cuatro

periodos glaciares importantes, interrumpidos por épocas en las que el clima se hacía más cálido. En aquellos periodos interglaciares se reducían las capas de hielo, produciéndose en consecuencia una elevación en el nivel de los mares que en algún caso pudo ser de hasta unos cien metros. Imaginad el estrés evolutivo al que la vida estaba sometida en aquellos años del Cuaternario.

El inicio del periodo que corresponde a los últimos cinco millones de años es considerado por muchos zoólogos como **el punto álgido de la “edad de los mamíferos”**, caracterizándose prácticamente toda la época por la abundancia de grandes mamíferos, como el mamut, el reno, el oso polar, el rinoceronte lanudo... la mayoría de los cuales todavía viven hoy día.



Extensión máxima de hielos en algún momento de los últimos 2,5 millones de años (A partir de “Historia del clima de la Tierra“, Antón Uriarte)

A medida que el hielo avanzaba, los seres vivos emigraban hacia zonas más cálidas empujados por las barreras de los glaciares y en busca de alimentos. En Europa los mamíferos se vieron obligados a migrar hacia el sur, buscando refugio en los bosques de la península Ibérica, Italia o los países Balcánicos. Muchos de ellos, sobre todo los de gran tamaño como el mamut, el oso de las cavernas o el tigre dientes de sable, se extinguieron debido a que sus hábitats se restringieron bruscamente. En Norteamérica sucedió algo parecido desapareciendo también muchas especies de mamíferos como los de la familia de los camélidos, el tapir, el caballo y el yak.

Algo muy distinto sucedía más al sur. En las regiones cálidas de África y Asia, al no verse afectadas por las glaciaciones, la fauna no sufrió cambios bruscos. Es más, en latitudes próximas al ecuador aumentaron las lluvias, con lo que la vida vegetal y animal llegó a florecer en áreas del norte y el este de África que hoy son yermas y áridas. Hace unos 10.000 años el sur del Sahara se transformó en un paisaje lacustre similar al que hoy ofrecen ciertos parajes del actual Chad, en donde habitaban grandes ungulados y en donde el hombre practicaba sus cacerías.

Es en este último continente donde tuvo lugar el definitivo proceso evolutivo de los homínidos, que desarrolló diversas especies, desde los australopitecinos al *Homo habilis* y al *erectus*, consideradas antepasados directos del *Homo sapiens*. En alguno de los capítulos posteriores analizaremos esta evolución y las consecuencias que sobre ella tuvo la apertura del “Gran Valle del Rift”.

Además de la presión climática a lo largo de estos geológicamente “cortos” cinco millones de años, ocurrieron también algunos cambios geográficos que influyeron grandemente en la evolución de la biosfera. Uno de ellos, del que ya hablamos en el capítulo anterior, fue la elevación de la zona ecuatorial al este de África debida al fuerte vulcanismo de hace 2,5 millones de años, lo que había provocado la creación de alturas superiores a los 5.000 metros como los montes Kenia y Kilimanjaro. Aquí trataremos además de otros dos cambios sumamente importantes como fueron, por un lado, el ya comentado cerramiento del Istmo de Panamá, hace 3 millones de años, que unió a los dos continentes americanos; y por el otro, el cerramiento del “Puente de Beringia” ocurrido hace unos 40.000 años, que fusionó por el norte a Asia con América permitiendo las migraciones entre ambos continentes.

El **cierre definitivo del Istmo de Panamá** posibilitó un intercambio faunístico entre América del norte y América del sur. Podemos imaginar la intensa corriente zoológica como una rápida incursión de individuos en busca de los nuevos habitats nunca conocidos. La fauna laurásica, del norte, compitiendo con los Xenartros y los últimos emigrantes africanos de Sudamérica. Realmente debió ser un choque de trenes. Hacia el sur pasaron los ungulados -camélidos, venados, caballos-, los carnívoros -cánidos como el oso y felinos como el puma- y varios tipos de roedores. Del sur llegaron perezosos, monos platirrinos, los grandes roedores capibaras, ungulados específicos de Sudamérica e incluso aves del terror.



*Migraciones americanas relacionadas con el cierre del istmo de Panamá
(Imágenes de Wikimedia)*

En la competición llevaron las de perder los representantes sureños sobre los del norte, a pesar de que la migración neta fue bastante equiparable. Las especies que migraron al sur se establecieron en un mayor número y se diversificaron considerablemente más, de forma que se cree que causaron la extinción de una gran parte de la fauna nativa de América del Sur. Hubo dos razones principales para el éxito de unos y el fracaso de otros.

La primera fue una razón climática. Hay que pensar que el istmo se encontraba a unos 8° de latitud norte, es decir, era frontera de dos zonas climáticas no iguales y relativamente diferentes. Eso no hubiera sido así si hubiera ocupado una posición ecuatorial. Los animales del flujo norte-sur

no requerían grandes adaptaciones para tolerar las condiciones tropicales que predominaban más al sur, por lo que tuvieron libre el camino para expandirse a su arbitrio por el continente austral. En cambio, los emigrantes sudamericanos tuvieron que enfrentarse a cambios de clima y vegetación más extremos, los cuales se hicieron especialmente notorios en el momento en que llegaron a la región central de México, donde se levantaba una cordillera volcánica que lo atravesaba a la altura del paralelo 19° N, que creaba con su altura unas condiciones más secas y frías que las del sur. El resultado fue que la mayoría de los “tropicales” sudamericanos no lograron atravesar esta barrera, quedando confinados en América Central. En cuanto a aquellos grupos que lo lograron, su variedad disminuyó a medida que iban más al norte debido a las condiciones ambientales más secas y extremas, lo cual restringió en gran medida su éxito en el continente boreal.

La segunda razón fue el que la fauna norteamericana era genéticamente más resistente y adaptable como consecuencia de la continua presión selectiva a la que se había visto sometida durante los anteriores años del Cenozoico, cuando debieron competir con fauna que venía de Asia, Europa e incluso de África, continente éste que estaba unido a Europa desde hacía más de 25 millones de años.

El resumen de todo ello es que después del gran choque la fauna del continente americano cambió radicalmente. Muchos géneros de animales desaparecieron, sobre todo en la América austral, en donde se extinguió casi toda la fauna autóctona mientras surgía otra que constituyó la moderna fauna del continente sudamericano.

Cambiamos ahora de zona geográfica para comentar las interrelaciones que la biosfera mantuvo a través de la zona de unión entre Asia y América del norte. Actualmente ambos territorios se encuentran separados, pero no siempre fue así.

Hay evidencias biogeográficas que demuestran que Asia y Norteamérica estuvieron unidas con anterioridad. Podemos basar esta hipótesis en el hecho cierto de la semejanza entre los fósiles de ambos extremos del mundo. Sirva de muestra los restos de dinosaurios de finales del Cretácico, datados en unos 69 millones de años, muy semejantes en las dos zonas. Por contra, no hay tantas evidencias del intercambio de mamíferos, posiblemente por ser más difícil encontrar vestigios debido a sus pequeños tamaños. No obstante, esta migración está demostrada mediante fósiles encontrados en China, de hace 50 millones de años, ya en pleno

Cenozoico, y además se sabe que pudo ser intensa en Norteamérica hace unos 20 millones de años. Algunos de estos animales, como los gatos dientes de sable, ocuparon un vastísimo territorio desde Asia, Europa, África hasta América del norte. El que hubieran llegado al nuevo mundo sólo se puede explicar si el estrecho de Bering hubiera estado cerrado por un puente terrestre.



El Puente de Beringia hace 25.000 años

Es lógico que se tenga más conocimiento de los hechos más próximos en el tiempo, como así ha sucedido con los últimos cerramientos de Bering. Se suele hablar del “**Puente de Beringia**” a un amplio territorio entre Siberia y Alaska que se formó al menos dos veces, una hace 40.000 años y otra hace 25.000 y que resistió durante unos 14.000 años. Se formó durante una de las últimas glaciaciones, en la que el nivel de los mares bajó unos 120 metros al haber sido secuestrados grandes volúmenes de agua en los nuevos hielos que se habían generado. El descenso de las aguas dejó al descubierto un amplio territorio de hasta 1.500 kilómetros de ancho entre Asia y América.

Por el estudio de restos fósiles de la vegetación se ha llegado a la conclusión de que sorprendentemente en el Puente de Beringia se disfrutaba de un clima templado y seco, de forma que los hielos lo respetaron, permitiendo su colonización por plantas y animales que allí vivieron. Y es más, está comprobado también que no sólo poblaron el territorio, sino que también lo aprovecharon para migrar en ambas direcciones. Desde Asia cruzaron algunos mamíferos como el león y el guepardo, que evolucionaron haciéndose especies norteamericanas

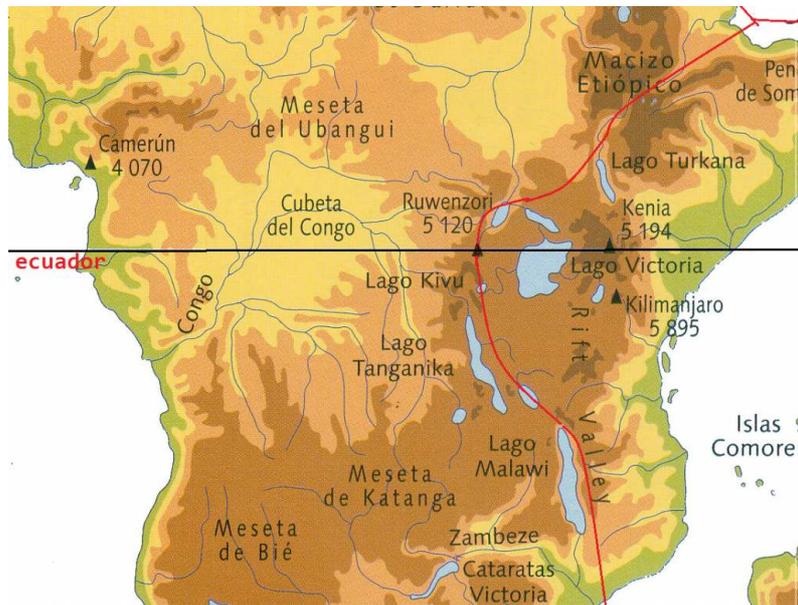
endémicas ahora ya extintas. Y desde Norteamérica migraron a Asia los camélidos que, como ya se ha comentado, más tarde se extinguieron en su territorio original. Por allí pasaron también los mamuts hacia América. Habían salido de África hacía unos 3 millones de años vía Europa y hacia Asia, casi a la par de los antepasados de los elefantes asiáticos. Existen importantes evidencias de que por allí pudieron entrar los seres humanos al territorio americano, hipótesis que comentaremos en una entrada posterior.

Durante los últimos 20 millones de años el clima global se enfrió considerablemente⁽¹²¹⁾, con un descenso medio de la temperatura de unos 11°C y un cambio en la vegetación que incluía una reducción de la franja boscosa ecuatorial. Pero lo más importante es que el continente africano experimentó otros cambios climáticos en ese período de tiempo, cambios directamente provocados por acontecimientos geológicos en este territorio, más concretamente en su mitad oriental. Todo ello, sin olvidar que la tendencia climática hacia el frío hacía que los mares se calentaran menos y que la atmósfera retuviera peor la humedad.

Todo se debió al hundimiento del valle del Rift en un momento en que el perfil de las lluvias iba decreciendo. Ya comentamos en el anterior capítulo del Cenozoico que se había iniciado hacía unos 20 millones de años y que dividió el continente africano en dos zonas, a oriente y a occidente. Esta tremenda grieta estuvo acompañada por una importante actividad volcánica que supuso la remodelación de la geografía central africana, al elevarse el nivel por la aparición de dos cúpulas magmáticas, una en Kenia y otra en Etiopía, de más de 2.500 metros sobre el nivel del mar, y conos volcánicos de más de 5.000. Estas alturas ejercían una “sombra” sobre la pluviometría de la franja ecuatorial de África que en un principio estaba recorrida en su totalidad por una espesa masa boscosa. La consecuencia fue un cambio en el patrón de lluvias en la zona este de esta franja, ya que a los monzones atlánticos, conocidos como monzones africanos, que regaban con generosidad durante el verano las selvas occidentales, les costaba llegar a la zona oriental del continente, de forma que a aquellas zonas altas llegaban muy debilitados. Allí los bosques comenzaron a ser más débiles y escasos, abriéndose grandes claros que rápidamente fueron ocupados por el monte bajo y la sabana. Una vez más se producía el dominio de las gramíneas sobre las masas forestales.

En el mapa siguiente podemos apreciar lo dicho. Los monzones que entraban desde el Atlántico “sobrevolaban” la selvática cubeta del Congo para llegar débilmente a la zona de la falla del Rift que estaba protegida por las alturas de los montes Ruwenzori, Kenia y Kilimanjaro y el Macizo

Etiópico. Ésa es la zona en donde se produjo el cambio de especies vegetales al disminuir la intensidad de las lluvias.



Mapa de la zona de los grandes lagos africanos en el gran valle del Rift (línea roja)

Sobre este horizonte más seco y con nichos ecológicos más disgregados, la falla del Rift se seguía moviendo, generando fracturas y hundimientos a todo lo largo de ella, hasta constituir un hondo valle de hasta mil metros de profundidad y cinco mil kilómetros de longitud en sentido norte/sur, lo que creó una nueva barrera, en este caso geográfica, que también condicionó en gran medida el aislamiento medioambiental de determinadas zonas en las que se desarrollaban unos particulares microsistemas.

En conjunto, África desplegó en la parte oriental de la franja ecuatorial un escenario asombrosamente variado, con tierras altas muy frías y valles verdes en donde se amoldaban manchas de frondosos bosques, y otras zonas con extensas sabanas. En conjunto, un lugar ideal para estimular nuevas vías de evolución en aquellos animales que hasta entonces habían prosperado al abrigo de las antiguas y vivas selvas ecuatoriales. Entre ellos, los simios. Y entre ellos, los homínidos. Todo ello lo empezaremos a analizar a partir del siguiente capítulo.

51. Iniciación a los más próximos homínidos

NOTA: A partir de este capítulo adoptamos un ligero cambio en la nomenclatura taxonómica de los simios, aceptando la más moderna, aunque más compleja, que presento en el árbol filogenético de unos párrafos más abajo. Lo más esencial es que lo que hasta ahora, y según la más antigua nomenclatura, era llamado homínido ahora lo llamaremos homininos. Para mayor enredo, la acepción “homínido” se mantiene, aunque cayendo unos escalones en el árbol, ya que ahora con este nombre nos referiremos a los simios africanos junto con los humanos: gorilas, chimpancés, bonobos, formas arcaicas del Homo y especies Homo. Dicho esto, prosigamos con el relato.

Con lo dicho en el capítulo anterior, que titulamos como “*Los últimos cinco millones de años*”, vamos a dar por cerrado el estudio de lo que pasó en el árbol filogenético de la Vida ¿Totalmente? No. Nos queda aún mucho que hablar de unas especies muy particulares. A partir de esta entrada y en las dos sucesivas focalizaremos la atención en nuestros más cercanos antepasados hasta llegar a *Homo sapiens*. Hoy comenzaremos con nuestros primos de la selva.

En este momento de la historia nos encontramos contemplándola desde la distancia, más o menos en un fotograma de hace aproximadamente unos **cinco millones de años antes de hoy**. Sabemos por el anterior capítulo que una amplia zona del este africano se había visto alterada progresivamente en su geología, clima y biotopos a lo largo de los anteriores 20 millones de años.

El panorama se había transformado desde unas potentes pluvisilva tropicales a un tablero de ajedrez en donde, escaqueadas, se disponían manchas de frondosos bosques húmedos pero más secos que las antiguas selvas y grandes extensiones de praderas y arbustos. Todo ello cruzado casi de norte a sur por una meseta en donde se hundía a cuchillo el valle del Rift. Este último era una zona atravesada por ríos caudalosos, con la influencia del calor magmático que trabajaba en su propio proceso de formación, un clima relativamente apacible y muchos ungulados paciendo en la sabana. Una geografía amable para la vida.

Era la geografía en donde tuvieron que pelear por la subsistencia unos animales muy próximos filogenéticamente a nosotros los *Homo*. Nuestros ancestros.



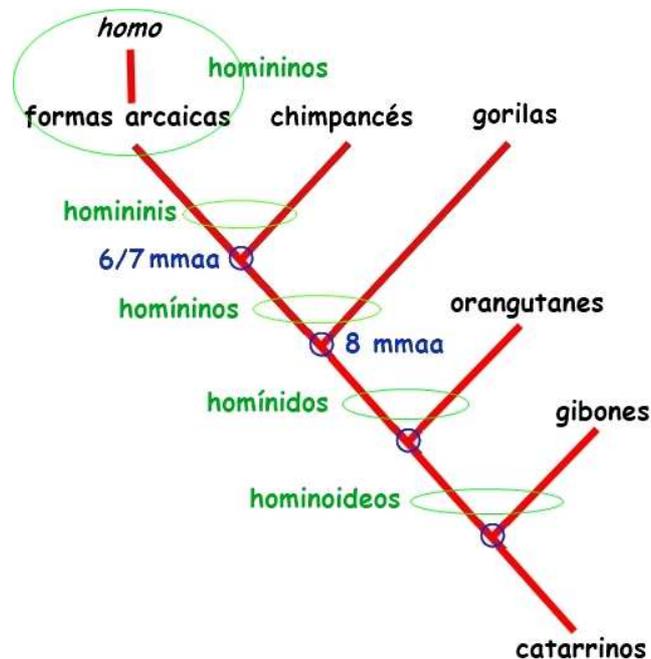
Imagen de la actual sabana de Kenia. No debía de ser muy distinta hace unos cinco millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Los simios habían sido muy abundantes en el vasto territorio del ecuador africano hace unos diez millones de años, cuando aún las húmedas selvas tropicales se extendían con vigor de oeste a este. Este hábitat les proporcionaba todo lo que sus vidas les pedían, básicamente fácil comida y protección, y de ahí el gran éxito del que disfrutaban en aquel momento por las ramas del árbol evolutivo. Los podemos imaginar por las frondas del dosel arbóreo moviéndose braquiando colgados de las ramas por los brazos, comiendo frutos, brotes y hojas. A veces, incluso algún sabroso insecto o gusano.

Poco a poco estos animales habían empezado a declinar, se cree que por los cambios geológicos que modificaron y redujeron sus hábitats, de forma que hace unos 7 millones de años la mayor parte de las especies habían desaparecido. Con el tiempo, empujados por la presión medioambiental, algunos de ellos abandonaron sus ancestrales costumbres arborícolas y comenzaron a bajar a la sabana en busca de nuevas oportunidades. A aquellos que habitaban al este no les quedó otra alternativa, más allá de las montañas de hasta 5.000 metros, en la extensa cuenca del Rift, sobre una geografía vegetal cada vez más rala y fragmentada, pues los árboles

entre los que buscaban su sustento habían prácticamente desaparecido. Estos pioneros empezaron a prosperar casi milagrosamente (aunque la evolución no sabe en realidad de milagros, sino simplemente de formas exitosas) a la vez que decaían sus primos que seguían en las selvas húmedas del oeste, en la cuenca del río Congo y en el golfo de Guinea. De estos, los gorilas, bonobos (el chimpancé enano) y chimpances comunes son sus últimos y únicos descendientes.

Hace 8 millones de años se habían desgajado las dos ramas a partir de algún antepasado común de gorilas y chimpancés. Dos millones de años más tarde, unos pocos de los esforzados habitantes de la zona este africana decían adiós a los protochimpancés. Atrás quedaba el ancestro compartido, haciendo posible que una de las dos ramas experimentara uno de los mayores asombros evolutivos: los *Homos* y sus formas arcaicas.



Árbol filogenético de los hominoideos con la moderna nomenclatura taxonómica. ¡Ojo con las tildes!

Tenemos ya a los hominínis construyendo sus respectivas ramas en el árbol de la vida. No sabemos mucho de ellos, pero por su proximidad familiar es casi obligatorio conocerlos un poco mejor, por lo que procede hacer ahora un sucinto paréntesis para comentar algunos aspectos de las costumbres de nuestros primos más cercanos, los chimpancés y los bonobos. Con ellos andamos hombro con hombro desde hace muchos millones de años y compartimos con ellos aproximadamente el 96% de nuestro acervo genético.

Ambos son de fisonomía muy parecida, aunque los bonobos son más pequeños, lo cual encaja bien con los análisis genéticos que indican que ambas especies se separaron hace sólo un millón de años. Los bonobos habitan al sur del río Congo, mientras que el chimpancé lo hace en extensos territorios al norte del mismo río. Parece que la divergencia entre ambos fue condicionada por la barrera natural que suponía el propio río, que imposibilitaba el intercambio sexual entre individuos. Para hacernos una idea de cuan terrible era la barrera que los aislaba, y los sigue aislando, diremos que el Congo actual tiene unos 4.380 kilómetros de longitud y en su curso medio puede alcanzar anchuras de 25 a 30 kilómetros.

Sus costumbres son también ligeramente diferentes. Ambos son tribales, viviendo en clanes de unos cien individuos formados por varios machos, hembras y jóvenes, que de día se dividen en pequeños grupos mientras buscan comida y luego se reúnen por la noche para dormir. Pero así como entre los chimpancés la jerarquía de dominancia es estricta, llegando a relaciones de violencia, entre los bonobos es de amabilidad y cooperación continua sin nada a cambio. A pesar del dimorfismo sexual -diferencia de tamaño macho/hembra- en el bonobo los encuentros agresivos entre géneros son nulos, ya que las hembras son socialmente tan importantes, o quizás más, como los machos. *Ningún macho bonobo puede liderar si no es a través de la coalición con una hembra* y mantienen una relación de por vida con sus madres y hermanas.

En los chimpancés sus manadas están muy jerarquizadas y los machos están continuamente enzarzados en luchas de poder. Son muy agresivos y celosos de su territorio, y para expandir sus dominios llegan incluso a invadir los territorios de machos rivales, matándolos a todos... a pesar de lo cual suelen sentir simpatía por los perdedores. Por ejemplo, si surge una pelea, casi todos apoyan al más débil, equilibrando de esta manera sus relaciones sociales. Incluso tras atacar a uno más débil en un momento de tensión suele surgir un arrepentimiento, y los mismos que le atacaron empiezan a lamer sus heridas. Los machos permanecen siempre dentro de la misma manada, por lo que les unen relaciones de parentesco muy próximas, lo que suaviza su relación.

Por contra, en ambas especies las hembras jóvenes abandonan la manada de nacimiento para buscar a otro grupo en donde seguir su vida, lo que constituye un sabio resultado de la evolución que preserva la fortaleza genética mediante el entrecruzamiento de individuos de distintos grupos. La entrada de la nueva hembra en un grupo ajeno requiere una serie de

hábiles alianzas: la joven debe engatusar a una hembra adulta del grupo donde pretende ser adoptada. Nos resulta cercano, ¿no?

Diríamos a la vista de lo anterior que chimpancés y bonobos son “casi” humanos, compartiendo aspectos psicológicos y de sentimientos que bien podrían ser el yin y yang de la conducta humana: la agresividad frente a la empatía.

Inicialmente, aquellos primeros homínidos que bajaron a la sabana debieron continuar lógicamente, y en la medida de lo que el medio ambiente lo permitía, con su vida de costumbres completamente arborícolas: seguirían alimentándose a partir de vegetales, mantendrían un dimorfismo sexual acusado, consecuencia de la necesidad de competir por las hembras, y mantendrían una incipiente relación social con sus iguales. Pero desde los seis-siete millones de años en que se inició la andadura hasta los primeros fósiles conocidos de especies arcaicas del *Homo*, hay un largo lapso de tiempo, de unos dos millones y medio más, durante los que lógicamente algo tuvo que pasar en el ámbito de la evolución y perfeccionamiento de las habilidades basadas en el bipedismo. Bajar de los árboles para atravesar un retal de sabana en busca del alimento que prometía un mancha de bosque vista en la lejanía, o para beber del río que discurría por campo abierto, fue una aventura que tuvo que seguir un camino dubitativo de pruebas, éxitos y fracasos. Aún faltaba mucho para que aparecieran evidencias de comportamientos propios de una inteligencia más compleja, como fueron la fabricación de útiles de piedra, la caza o la cultura.

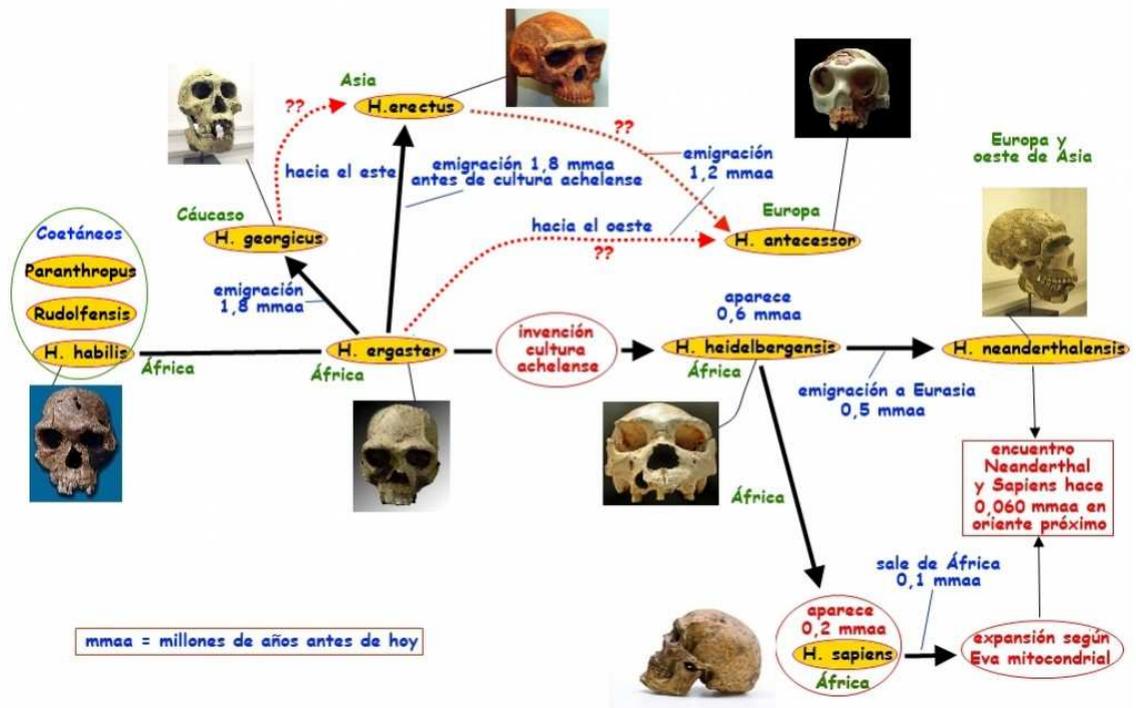
Seguramente habría empezado también un incipiente mundo de relaciones sociales, basado en las interrelaciones de una comunidad arborícola, pero modulado por las nuevas necesidades, algo que se iba aproximando a la vida de los actuales chimpancés. Avisar del peligro, comunicar dónde se encuentra alimento en abundancia, una relación familiar más intensa obligada por la necesidad de conseguir alimentos para madres y crías, alimentos cada vez más escasos en sus hábitats dada la dominancia progresiva de la sabana. Y a partir de las relaciones familiares, unas relaciones sociales de grupo que pudieron tener su inicio en la colaboración y defensa mutua. Todo ello de forma muy incipiente, primitiva y lenta. No es difícil imaginar que esto es lo que debió pasar en los ciegos dos millones y medio de años sin fósiles.

¿Cómo continuó el camino? El escenario parece que se ilumina hace unos cuatro millones y medio de años, al poco de producirse el inicio de una

época de enfriamiento global. A partir de allí disponemos de información ¿suficiente? como para detectar una senda ramificada de cambios en anatomía, costumbres alimenticias, relaciones sociales y complejidad de inteligencia, que desembocó finalmente en el *Homo*. Por delante quedaban por conquistar los grandes hitos evolutivos que les facilitarían tal condición: la bipedestación con todos los cambios morfológicos que ello supuso, la habilidad manipuladora de la mano que se comportó como una auténtica pinza de precisión, un aparato masticador modificado en donde los caninos se asemejaron a los incisivos, un índice de encefalización creciente, un largo periodo de maduración infantil que exigiría por tanto un cuidado de los padres más prolongado en el tiempo, la conquista del lenguaje, la conciencia del Yo y, por último, la conquista de la tecnología.

Sabemos de su evolución gracias al análisis tan tecnificado de los pocos restos fósiles de los que disponemos. La morfología de los dientes es un escaparate hacia el tipo de alimentación e incluso hacia el periodo de maduración de las crías. Esto último permite esclarecer la evolución de la forma de la pelvis femenina. La estructura de los huesos es la base para suponer la robustez corporal, ya que son el anclaje de los músculos, así como para determinar el avance en la conquista del bipedismo. Evidentemente, el estudio de los cráneos permite hacer hipótesis comparativas sobre el desarrollo de las habilidades y del lenguaje. El análisis detallado del entorno en donde se van encontrando los fósiles descubre sus costumbres y hábitos sociales, así como el estudio comparativo entre tamaño de huesos homólogos de machos y hembras permite hacer hipótesis sobre la relación social entre ellos y sus crías. El camino seguido por los *Homos* y sus formas más arcaicas no se conoce con exactitud, pero estamos convencidos de que lo tenemos está bastante bien conjeturado en base a depurados razonamientos científicos. Razonamientos que, precisamente por ser científicos, quedan a la espera de lo que dirán los estudios de los fósiles que están por encontrar en el futuro.

Creo que será útil en este punto el presentar, aunque sea sólo sucintamente, el siguiente esquema, que nos da a vista de pájaro una útil reseña sobre los momentos y lugares de la evolución y emigración del género *Homo*. Es un adelanto de lo que veremos en un capítulo posterior, en el que completaremos la información general dada hoy sobre el punto de partida que abrió un nuevo y especial camino en el árbol de las especies. Nos preguntaremos cómo fueron apareciendo progresivamente los eslabones de la familia humana: ¿de qué manera se iban conquistando las destrezas que permitieron nuestro camino evolutivo? ¿Cómo nos extendimos por el planeta?

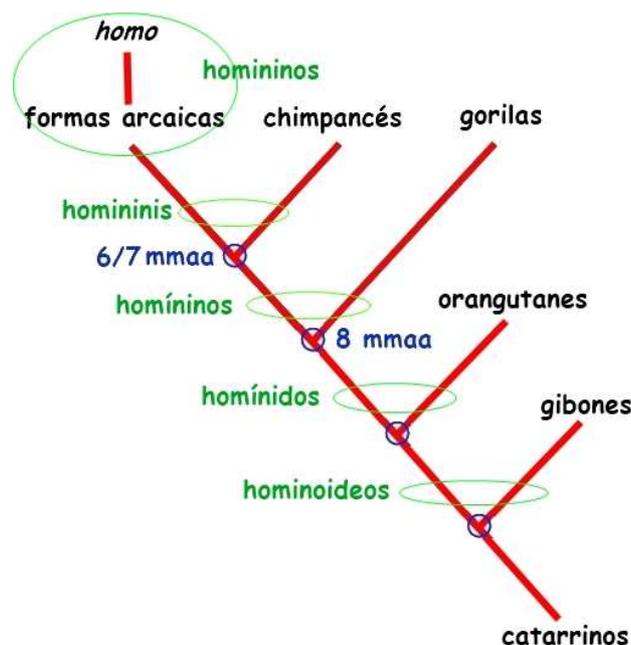


Cronología y camino evolutivo del Homo (Elaboración propia, imágenes a partir de Wikimedia, CC BY-SA 2.5 Generic, dominio público y GNU FDL 1.2)

52. Desde el primer homínido hasta el nuevo Homo

Entre otros temas, en el capítulo anterior habíamos analizado someramente las circunstancias ambientales particulares a las que se vieron sometidos los simios africanos más avanzados, para acabar de desvelar su hábitat, sus modos de vida y su camino evolutivo. Ahora iniciaremos el detalle de esto último hasta el momento en que el *Homo* aparece por primera vez en el escenario.

A manera de ayuda al encuadre del momento, repito aquí el árbol filogenético de los hominoideos que ya conocemos del capítulo anterior.



Los primeros fósiles conocidos de homínidos, el grupo formado por los antecesores arcaicos del *Homo* y por él mismo, corresponden a *Sahelanthropus tchadensis* con una antigüedad de 6 a 7 millones de años, más o menos cuando el chimpancé inició su línea filogenética independiente de la nuestra. De “Sahe” hablamos ya en el momento que estudiamos los periodos Oligoceno y Mioceno. Tras los fósiles de *Sahelanthropus* nos encontramos con los de *Orrorin tugenensis*, con una antigüedad entre 6,2 y 5,6 millones de años. El nombre significa en la lengua de la etnia keniata de los Tugen -los habitantes del lugar del yacimiento- “el hombre original de Tugen”. La forma de los huesos de sus

caderas permite asegurar que de alguna manera en ellos había comenzado la bipedestación como una alternativa más para la marcha.

En la cadena temporal de los fósiles nos encontramos más tarde con los del etíope *Ardipithecus ramidus*, que datan de hace 4,4 millones de años. El estudio de estos fósiles nos indica que “Ardi” debía ser del tamaño de un chimpancé y que posiblemente aún seguía manteniendo las costumbres arborícolas de sus abuelos, con desplazamientos por braquiación, colgándose de las ramas con los brazos. No obstante, del estudio de la parte superior de su pelvis se puede inducir que también era bípedo, aunque apoyándose en la parte externa de los pies. Es por eso que se cree que *Ardipithecus* aún tenía el dedo gordo en posición no paralela a los otros dedos del pie. Su capacidad craneal, de unos 350 centímetros cúbicos, era muy semejante a la de los actuales chimpancés.

En resumen, los sucesivos fósiles datados en esa extensa época corroboran que el bipedismo ya era una alternativa adoptada por los individuos que comenzaban a abandonar la protección de las cúpulas de los árboles. Como comenta el paleoantropólogo Bermúdez de Castro en su libro “*Orígenes*“, tanto *Sahelanthropus*, como *Orrorin* como *Ardipithecus* habían bajado de los árboles, sabían desplazarse bipedestando, pero todavía vivía en ambientes completamente cerrados y boscosos. No se habían atrevido aún con las sabanas. Andaban seguramente de forma torpe, con movimientos parejos a los que efectuaban durante sus paseos por las alturas, recordando aún el balanceo vertical del avance braquiando a través de las ramas. Quizás ayudados con los nudillos de sus manos, que apoyaban en el suelo durante la marcha. Poco a poco la estructura ósea fue cambiando, haciendo cada vez más eficaz el caminar con las dos extremidades inferiores, de tal forma que hoy en día, para una marcha por tierra, nosotros los hombres estamos mejor preparados con nuestro bipedismo que un chimpancé cuadrúpedo. No es un desdoro para ellos: nos ganan entre las ramas, nosotros sólo somos buenos en tierra.

Podríamos decir que el aparente éxito radica en determinados avances estructurales:

A. El hueso coxal (el que corresponde al conjunto de la cadera y bajo abdomen) se ha modificado, de forma que tiene una mayor resistencia estructural, compatible con los mayores esfuerzos que supone para los huesos el soportar el peso corporal durante la marcha bípeda. Recordad que hemos pasado de apoyarnos sobre cuatro patas a hacerlo en una sola durante la marcha.

B. Nuestro esqueleto está dispuesto de forma que la fuerza del peso se transmita perpendicularmente al suelo, no hay pérdidas en componentes horizontales del esfuerzo.

C. Una tercera causa es que en los bípedos el centro de gravedad está prácticamente situado en el centro geométrico, el ombligo, lo que permite un desplazamiento rectilíneo del centro de masas.

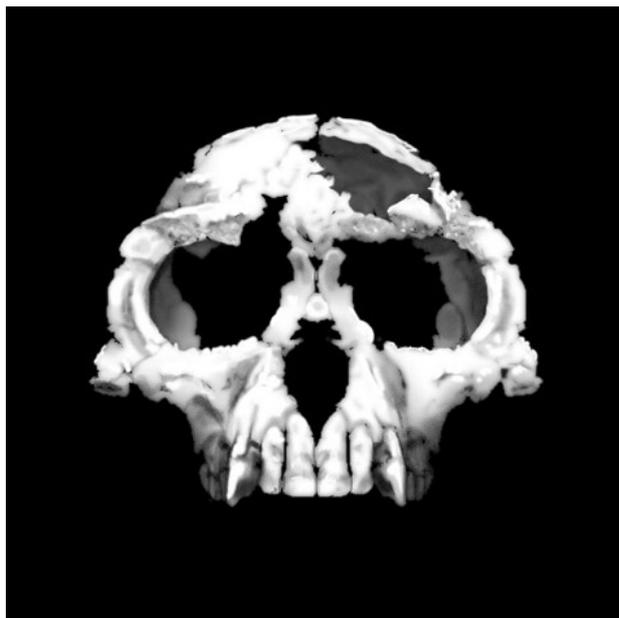
D. En lo anterior es determinante el hecho de que las “alas” coxales pasaron a abrirse hacia los laterales. En este giro se vieron implicados también determinados músculos del glúteo, cuyo punto de implante se lateralizó. Con ello se minimiza el desplazamiento lateral del centro de gravedad al andar. Ya no es preciso bambolear las caderas hacia los lados, por lo que se consigue un desplazamiento más eficaz.

E. Por último, nuestro pie es plano, con un dedo pulgar alineado con los otros cuatro compañeros, sin hacer pinza, formando una superficie segura donde asentarse. La planta se arquea formando una estructura de “ballesta” que propulsa la marcha.

Andar, en el suelo, es eficiente. No quiere esto decir que bipedestando se sea más veloz, lo que sería una ventaja para cazar o no ser cazado, sino que el desplazamiento a dos patas es energéticamente el más eficaz, y por eso se puede andar muy lejos. Así, nuestros antepasados ganaban por agotamiento a los ungulados de los que se alimentaban tras cazarlos. O podían ir más lejos a buscar alimento. Por esta razón -además de por otras ventajas, como el poder mirar desde más arriba o el liberar las dos extremidades superiores para otras funciones- la evolución encontró que el bipedismo bien podía ser una solución competitiva y viable. Nosotros, los humanos, somos los mejores testimonios de esta afirmación.

¿Y por qué bajaron al suelo aquellos simios africanos?

Como ya comentamos en el anterior capítulo, eso fue motivado casi con toda seguridad por la fragmentación que habían experimentado sus hábitats seculares, lo que conllevó una progresiva mayor dificultad a la hora de conseguir sus alimentos habituales, a los que habría que ir a buscar cada vez más lejos, incluso a otras “islas” boscosas, con la imperiosa necesidad de emprender una peligrosa y desconocida aventura a través del monte bajo y la sabana. Para los primeros homínidos, a la larga, la marcha a dos patas se fue demostrando más resistente que la primate, semicuadrúpeda, y por tanto más segura. Quién lo consiguió sobrevivió, perfeccionándola a lo largo de su camino evolutivo.



Cráneo de Ardipithecus ramidus, fósil de un individuo coloquialmente conocido en el mundo de la paleoantropología como “Ardi” (Wikimedia, CCAttribution 2.0 Generi)

Arriesgó en la aventura, no tenía más remedio, pero encontró una de las llaves fundamentales que le impulsaría en su camino hacia la inteligencia compleja, hacia el género *Homo*: se puso a dos pies y liberó las manos. La mayoría de antropólogos son de la opinión de que éste fue el primer gran cambio en el camino evolutivo que llevó desde los antropomorfos hasta los humanos.

Liberando las manos pudo usarlas para otros procesos altamente productivos y con gran valor añadido en el campo de la selección natural, como pudo ser el explotar nuevas fuentes de alimentos, desenterrando raíces e insectos, o el poder transportar la comida encontrada y en mayor cantidad hasta una zona segura. Pudo resultar también más atractivo a la hora de conseguir pareja, pues podía ser comparativamente más espléndido, ya que podía conseguir más alimento para sus hembras, que en consecuencia podían gestar más y mejor a sus crías, y podía alimentar también mejor a estas últimas. O bien defenderse mejor ante las amenazas, ya que pudo agarrar palos o lanzar piedras, lo que alargó su radio de acción defensivo.

Avanzando un poco en el tiempo nos encontramos con unos nuevos personajes homínidos. Efectivamente, hace 4,2 millones de años se movían por las tierras altas de Kenia los *Australopithecus*, los “*monos del sur*”. Un género del que se conocen hasta seis especies distintas y que

desaparecieron hace 2 millones de años. Se movían no sólo por territorios de la actual Kenia, sino desde Sudáfrica hasta el Chad y Etiopía. Su volumen cerebral rondaba los 500 centímetros cúbicos, un gran avance frente a los 350 de “Ardi”. Eran de complexión y musculatura robusta, brazos ya proporcionalmente más cortos, siendo el tamaño de las hembras unos dos tercios del de los machos, un marcado dimorfismo sexual señal clara de que debían seguir peleando por ellas, como ancestralmente, y así mantener un harén en continua “producción” de crías. Habían desarrollado unos molares más grandes y con una capa de esmalte más gruesa, lo que indica el inicio de un cambio alimenticio que comenzaba a pasar de frugívoro y folívoro, a comer semillas y tubérculos más duros, que manipulaban con unas manos en donde el pulgar ya participaba en la pinza de los dedos.



Cráneo de Australopithecus africanus. En este caso el fósil pertenece a la “Señorita Ples” (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Por tanto, parece claro que aún seguirían explotando los recursos de los bosques, que en aquel momento eran más secos y estaban más aclarados. Probablemente no habían abandonado completamente la vida arborícola, aunque pasarían mucho tiempo en el suelo, desplazándose de forma bípeda en grupos pequeños formados por un macho dominante con sus hembras y crías. Por eso la mayoría de los machos adultos serían solitarios. Durante el día, sin objetivos muy premeditados, se dedicaban a la búsqueda de frutos, vegetales, agua y cobijo, recorriendo lugares conocidos y atentos a nuevas oportunidades, muy alerta ante la posible presencia de otro grupo que

podría suponer una seria competencia, quizás el intento de monopolizar una zona con fácil alimento. Unos chillidos amenazadores y los colmillos al aire resolverían el tema. Sus cerebros eran un poco mayores que el de los actuales chimpancés, y por estudios de sus fósiles se sabe que estructuralmente no estaban aún capacitados para el habla. No obstante, debemos suponer que serían capaces de intercambiar otras señales sonoras, muy pocas, pero con un incipiente sentido. En su comportamiento no debían ser muy diferentes a los actuales mandriles que habitan las selvas ecuatoriales africanas. A la vista de la morfología de los huesos pélvicos de las hembras, muy semejantes aún a lo que se observa en chimpancés, deducimos que las crías nacían con un grado de madurez avanzado (con relación a la futura madurez como adultos) y que, por tanto, en sus primitivos grupos sólo se necesitaba una rudimentaria socialización de las tareas de cría y alimentación. Por la noche, los individuos de las hordas buscarían la protección de las ramas de los árboles, en donde se reunirían formando grandes grupos.



Parte de la traza de huellas de Australopithecus en el yacimiento de Laetoli, Tanzania (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

La primera evidencia de la marcha bípeda moderna se remonta a hace 3,7 millones de años, es decir, en plena “era” de los *Australopithecus*. Se trata de unas improntas de huellas de dos o tres individuos dejadas sobre cenizas volcánicas, sobre las que después llovió, cimentándolas. Se han encontrado en el yacimiento tanzano de Laetoli. Claramente el pulgar de los pies no estaba separado de los otros cuatro dedos, a semejanza de lo que pasa en las manos, por lo que se reafirma la “hominidad” corporal de los *Australopithecus*. Aún no había aparecido ningún rastro de herramientas. Ello parece indicarnos que la bipedestación fue la primera de las conquistas en el camino del éxito evolutivo del *Homo*. Recordemos lo que

decíamos en el capítulo anterior: “... la bipedestación, con todos los cambios morfológicos que ello supuso, la habilidad manipuladora de la mano que se comportó como una auténtica pinza de precisión, un aparato masticador modificado en donde los caninos se asemejaron a los incisivos, un índice de encefalización creciente, un largo periodo de maduración infantil que exigiría por tanto un cuidado de los padres más prolongado en el tiempo, la conquista del lenguaje, la conciencia del Yo y por último, la conquista de la tecnología”.

De Kenia proviene uno de los fósiles más renombrados de *Australopithecus*. Se trata de la conocida Lucy, una hembra de *Australopithecus afarensis* de 3,2 millones de años de antigüedad. De un metro de altura y unos 30 kilos de peso, estaba dotada con un pequeño cráneo de unos 450 centímetros cúbicos, ligeramente superior al de un chimpancé. Esta “dama” se ha hecho importante para la antropología gracias a que se ha podido recuperar gran parte de su esqueleto, cosa inusitada para un individuo único. Conocer la mayor parte de la estructura ósea de un espécimen da mucha información sobre su morfología y los hábitos de su especie. Su nombre, Lucy “...in the sky with diamonds...”, fue realmente un homenaje a los Beatles por parte de los paleoantropólogos que la descubrieron. Cuando se produjo el excitante suceso esta canción les estaba amenizando el trabajo.

Los homínidos *Australopithecus* no andaban solos por sus territorios. Coetáneos a ellos, hace 3,5 millones de años, son los fósiles de un controvertido homínido distinto llamado *Kenyanthropus platyops*, que como se puede deducir de su nombre fueron “ciudadanos” de Kenia. Un poco más moderna, aunque en un inicio también vecinos de los australopitecos, se encuentra la rama del género *Paranthropus*, del que se conocen tres especies. Su capacidad craneal rondaba los 500 centímetros cúbicos. Habitaban principalmente los territorios del África oriental y meridional y estaban caracterizados por una gran robustez de la mandíbula y molares, y una tremenda cresta ósea sagital en el cráneo indicadora de los potentes músculos maxilares que se afianzaban en ella. Desaparecieron hace unos 1,2 millones de años, y la explicación se sustenta en el hecho de su tremenda especialización en la dieta, centrada en vegetales, semillas y duras raíces. De ahí su potente estructura masticadora. Con esta dieta nunca se podría conseguir la energía que necesita un cerebro con aspiraciones de desarrollarse y ser inteligente. Pensamos que desaparecieron por este motivo al ser desplazados por otras especies con una alimentación más diversificada.

A estas alturas de nuestra historia sabemos muy bien que la Vida es oportunista, explora cualquier nicho ecológico y sabe sacar provecho de él. Así, junto a *Paranthropus*, sabemos que sobrevivían los individuos de un nuevo género homínido que comía... carne, alimento altamente energético y de fácil digestión.

Nos estamos refiriendo a los *Homo* de los que tenemos noticias africanas, según los más clásicos estudios, desde hace casi 1,9 millones de años. Digo lo de los más clásicos estudios ya que recientemente se ha reanalizado⁽¹²²⁾ fósiles del yacimiento tanzano de Olduvai con el resultado de que se debería adelantar la aparición del género *Homo* hasta una época de hace unos 2,3 millones de años.

Sea cómo y cuándo fuera, con ellos se abrió la puerta de la “humanidad” de pensamiento abstracto, racional y planificador, de sociedades complejas y tecnologizadas.



Paranthropus aethiopicus

Homo habilis



Cráneos de Paranthropus y de Homo habilis donde podemos observar la mayor robustez del primero (Wikimedia, GNU FDL 1.2 y dominio público)

¿Por qué hemos clasificado a los *Homo* como un nuevo género? ¿cuáles fueron las características morfológicas o culturales que usan los antropólogos para abrir una nueva ficha en la filogenia?

Usando palabras⁽¹²³⁾ del paleoantropólogo José María Bermúdez de Castro: “Los científicos hemos decidido que tener un cerebro de más de 500 centímetros cúbicos y capacidades cognitivas apropiadas para transformar la materia prima pueden ser criterios suficientes como para pertenecer al selecto club del género *Homo*”. Daba igual si por su aspecto

fueran más parecidos a un chimpancé que a ti y a mí. A efectos clasificatorios ha primado el criterio de la capacidad cerebral y del uso avanzado de esta capacidad. Y se piensa que estas dos características aparecieron por primera vez con los nuevos *Homo*'s: los *habilis*, de ahí su nombre.

No obstante lo anterior, a los antropólogos se les plantea un serio dilema. En el yacimiento etíope de Gona se han descubierto⁽¹²⁴⁾ útiles “humanos” con una antigüedad que ronda los 2,5 millones de años, si no más. Y para acabar de sobrecalentar aún más las emociones antropológicas, en un artículo⁽¹²⁵⁾ de la revista Nature (2015) se plantea el hecho de lo que parecen ser unas herramientas líticas aún más antiguas, datadas en 3,3 millones de años, encontradas en el yacimiento keniano de Lomekwi.

¡¡Pero ¿no eran los *Homo habilis* de 1,9 millones de años los que inventaron la tecnología?!!

Sólo caben dos soluciones imaginables: ¿fueron los *Homo habilis* más antiguos de lo que se cree hasta ahora -mandan los fósiles- o bien algún antiguo *Australopithecus*, u otro homínido de la época como pudo ser *Kenyanthropus*, ya había sido capaz de fabricar herramientas líticas?

Dado que los *habilis* crecían y se desarrollaban prácticamente como lo hacían los *Australopithecus*, ¿por qué tiene que ser más importante, a la hora de fijar criterios de clasificación, el hecho de tener un mayor cerebro? ¿No debería ser más importante el resultado de la actividad de estos cerebros, aunque fueran distintos en tamaño? Más aún sabiendo, como lo veremos en un futuro capítulo, que la evolución cultural del hombre siempre fue significativamente posterior a la de su encefalización.

No tenemos datos fósiles de *habilis* tan antiguos, aunque la información comentada más arriba que nos llega desde Olduvai lo acercan mucho, como para que fueran coetáneos de las herramientas encontradas en el yacimiento de Gona en Etiopía. A lo que habría que añadir los resultados de otro estudio⁽¹²⁶⁾ presentado en 2015, que nos informa de la existencia de unas ciertas evidencias acerca de que, estructuralmente, las manos del *Paranthropus* o de las especies más modernas de *Australopithecus* estaban ya preparadas para el manejo “delicado” que suponía el tallar piedras.

Con estos datos, una incógnita y una neblinosa realidad, algunos paleoantropólogos se comienzan a preguntar: ¿debería abandonar *habilis* el género *Homo* para ingresar en el *Australopithecus*? ¿Un *Australopithecus habilis*?

La controversia está servida. Más allá del evidente interés para los especialistas, cosa en la que no entro, me parecería asombroso el que unos seres tan atrás en la línea evolutiva fueran ya capaces de plantearse pensamientos recursivos, los necesarios para poder racionalizar, a partir de una piedra en bruto, el proceso que tendrá como resultado una herramienta y el camino de manipulación intermedio.

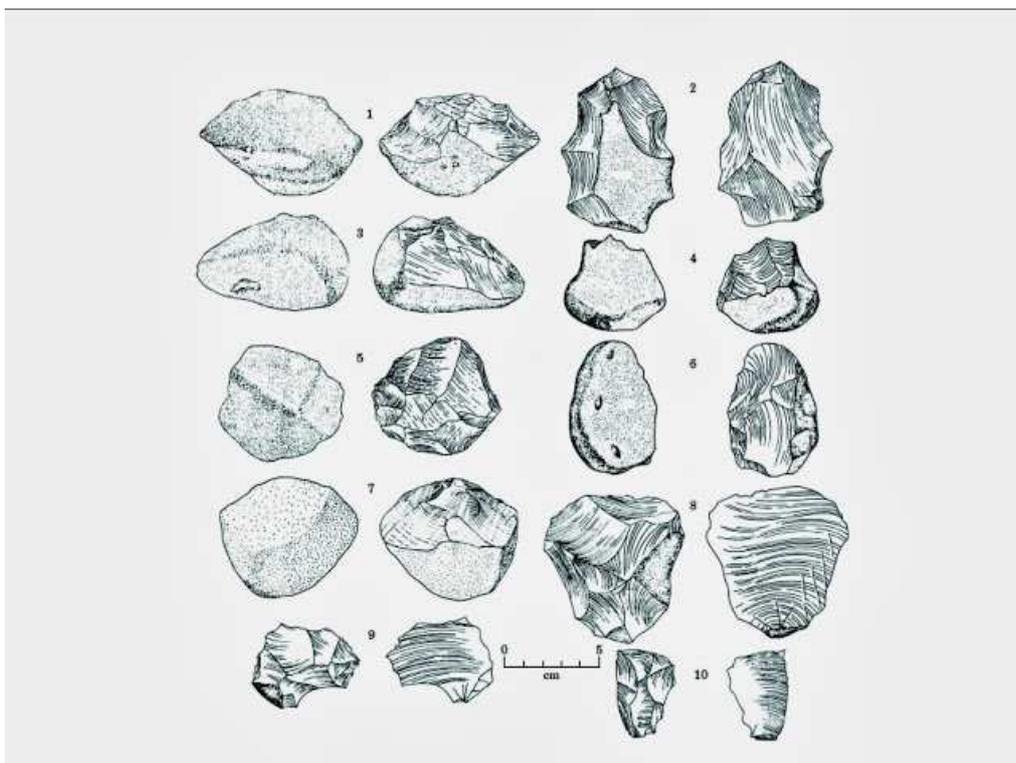
Mientras esperamos para ver cómo se resuelve tan interesante hipótesis -en el próximo capítulo aportaré lo que puede ser una posible pista-, nosotros seguiremos los siguientes pasos de nuestra historia sin abandonar los actuales cánones de la ortodoxia antropológica: revisaremos el posible devenir filogenético *Homo*, empezando por el *habilis*.

53. Los Homo

En el capítulo anterior llegamos a conocer el devenir evolutivo de nuestros ancestros “humanos” más antiguos, hasta que nos encontramos con un nuevo individuo que había incrementado su capacidad craneal en una cantidad significativa: el *Homo habilis*. Habíamos sembrado la duda de si en vez de homo correspondería catalogarle como australopiteco: *Australopithecus habilis*. También avisamos de nuestro amor por la ortodoxia, posición que se me antoja juiciosa para un simple aficionado de estos temas, así que en nuestro escrito seguirá siendo un *Homo*. Pero ¿quién fue este hombre nuevo?

Como comentamos en el capítulo 50 titulado como “*Los últimos cinco millones de años*”, hace 2,6 millones de años, como consecuencia de su deriva continental, se unían las dos Américas cerrando con ello el actual istmo de Panamá. Esta circunstancia consolidó el último drástico descenso de las temperaturas globales. Datadas aproximadamente en esta época se han encontrado en el yacimiento etíope de Gona las primeras herramientas líticas que fueron ideadas y fabricadas por un ser vivo. Muchos antropólogos opinan que este cambio climático tuvo que ser la espoleta del cambio cultural observado, la presión ambiental necesaria para provocar la emergencia de una nueva habilidad cerebral nunca imaginada. Por desgracia, los fósiles asociados en el mencionado yacimiento etíope no permiten deducir la autoría, quedando la duda de qué especie fue la que las talló.

Realmente parece que el árbol de la evolución humana en aquellos lejanos años se nos complica. O se nos está aclarando, según queramos verlo, ya que recientemente se ha comunicado⁽¹²⁷⁾ la existencia de una posible y nueva especie *Homo*, que a la vista de la morfología del fósil analizado -una mandíbula encontrada en el yacimiento de Ladi-Geraru, en la región etíope de Afar-, sería la de un individuo intermedio entre el australopiteco y el hábilis. Se movía por una verde sabana africana, semejante al actual Serengueti, hace 2,8 millones de años ¿suficientemente inteligente como para ser el artífice de las herramientas de Gona? No en vano Gona está a escasos 50 kilómetros del yacimiento de Ledi-Geraru. Dejemos trabajar a los antropólogos y sigamos con la doctrina tradicional dando un paso más en nuestra historia.



Dibujo de artefactos líticos encontrados en el yacimiento de Gona (A partir del informe⁽¹²⁸⁾) sobre el tema del profesor Shileshi Semaw)

Con una cronología posterior a la de las primeras herramientas líticas aparecen en el registro fósil vestigios de un homínido, que está ya clasificado como del género *Homo*, sustancialmente diferente a los australopitecos, aunque no en su aspecto exterior. Nos estamos refiriendo a una época que tradicionalmente se data en 1,9 millones de años, datación que quedó revisada⁽¹²⁹⁾ en 2015 para adelantarla en el tiempo unos 400.000 años. Estos hombres nos han aportado algo muy significativo: con ellos se han encontrado, por primera vez en yacimientos de una especie humana, toscas herramientas de piedra o hueso. Se trataría, por tanto, del primer emparejamiento fehaciente del hombre con su herramienta. Además de esta extraordinaria novedad, de sus restos óseos se deduce un cráneo más redondeado y con una capacidad que en algunos casos superaría los 600 centímetros cúbicos –un tercio mayor que en el australopiteco-. La cara se había vuelto más pequeña y menos prognata, consecuencia de haber disminuido el tamaño de sus muelas y mandíbulas. Sorprende que esto pudiera suceder en el mismo nicho vital que el de los australopitecos o los parántropos -con sus fuertes muelas y grueso esmalte- lo que es clara evidencia de un cambio de hábitos en la base de su alimentación: *comían también carne*. Los productos alimenticios eran cada vez más difíciles de conseguir en un mundo progresivamente más seco mientras que la carroña,

restos de animales muertos por predadores superiores, se encontraba al alcance de la mano ¿por qué no aprovecharla? No eran unos refinados hombres del siglo XXI, sino unos hombres hechos a la dureza de la vida del Pleistoceno temprano.

Su esqueleto hace pensar que contaban ya con una arquitectura corporal propia de un *andar vertical*. Pero eso no quita para que su aspecto externo fuera aún bastante similar al de un australopitecino habituado a la vida arbórea, tal como ya se ha comentado. En esta nueva especie los machos ya no doblaban en peso y tamaño a las hembras, sino que, como en los actuales chimpancés, las sobrepasaban tan sólo en un 20%. Esta circunstancia se revela como muy importante, ya que indica que en sus grupos la presión evolutiva no hacía necesario el dimorfismo sexual. Y eso se debe traducir en que machos y hembras, en cierto sentido, ya debían colaborar en una *sociedad familiar*. Los machos adultos no dominantes no necesitan hacer una vida solitaria dentro de la manada como sucedía con los *Australopithecus*, por lo que es fácil imaginar que además se generarían en el grupo fuertes relaciones de parentesco, suscitándose menos tensión y menos peleas, más colaboración e incluso alianzas.

Todo parece indicar también que a la predominante comunicación gestual se le habría añadido una verbalización incipiente, ya que sus *faringes comenzaban a colocarse en una posición profunda en el cuello*. El análisis del relieve interior de los cráneos, copia del relieve del propio cerebro, indica ya la existencia de una incipiente área de Broca, uno de los centros neuronales de gestión del *lenguaje*. Los neurobiólogos saben muy bien que esta área cerebral también se activa durante la comunicación por gestos. ¿Pudo ser el lenguaje sonoro un valioso refinamiento del lenguaje gestual?

No obstante, para poder “fonar” perfectamente había que tener desarrollado un conjunto de órganos que físicamente lo permitieran. No sólo unas cuerdas bucales emisoras del sonido original, sino también una caja de resonancia muy versátil con la que articular y unir un abanico de sonidos y frecuencias diferentes. Esta caja la forman los conductos respiradores superiores, la boca, la lengua y los labios. Al bipedestarse, y tomar por consiguiente la posición erguida, se forzó el giro del cráneo hacia un emplazamiento más elevado y vertical. Ello modificó la forma de la garganta, haciendo que la laringe adoptara una posición más baja, lo que supuso la clave que introdujo la versatilidad necesaria en la mencionada caja de resonancia. Este *Homo* había iniciado el camino que se culminó mucho más tarde, hace unos 150/100 mil años, momento en el que pudo surgir el lenguaje verbal articulado. Es en este momento cuando se

observa, a través de los descubrimientos paleontológicos, algunos desarrollos culturales que parecen manifestaciones de un pensamiento abstracto más complejo. Necesitamos hablarnos interiormente para pensar.

Hasta ahora hemos estado hablando de un “nuevo hombre”, pero aún no hemos desvelado su “apellido”... aunque probablemente ya todos sabemos que nuestro personaje se trata de *Homo habilis*, precisamente llamado así por su aparente pericia para la **confección** de herramientas. Sus fósiles fueron encontrados por primera vez en Tanzania por el conocido matrimonio de antropólogos Mary y Louis Leakey. Su antigüedad rayaba los dos millones de años.

Quiero explicar por qué en el párrafo anterior he enfatizado con negritas la palabra “confección”: porque en esto estuvo la clave. Conocemos muchos animales que usan herramientas, pero no están elaboradas. Pajitas para “pescar” termitas, espinas para extraer insectos de las grietas de los troncos, piedras para abrir huesos, partir nueces o romper la cáscara de los huevos... pero no tenían que confeccionarlas, simplemente tomarlas de su entorno y usarlas, lo cual indica una habilidad que ciertamente se aproxima a lo consciente cerebral. Pero lo del *Homo habilis* se trataba de otra cosa muy distinta.

En contraposición, imaginemos ahora a nuestro primer *Homo* africano rumiando en su cerebro. Primero tuvo que percibir que el canto de una piedra rota cortaba, lo cual era fácil, pero además tuvo que darse cuenta de que esta propiedad cortante podía ser usada para más cosas que cortar el pie que la había pisado. Y esto, el buscar nuevas utilidades, ya es harina de otro costal, pues tiene un componente racional importante. Pero aún hay más. Nuestro hombre se percató de que algunas piedras daban mejores aristas y más duraderas que otras: tuvo que tomar decisiones para encontrar este “tecnologificable” material. Además, se dio cuenta de que algunas piedras eran mejores como herramientas secundarias: al hacerlas chocar con las que se les buscaba filo se conseguía el objetivo de una forma más rápida y limpia. La experiencia le dijo que si tomaba la piedra de una determinada manera y le daba el golpe en unas direcciones privilegiadas, todo iba sobre ruedas, y fue capaz de asimilar esta experiencia. Y, además, fue capaz de transmitir su técnica, que se conoce *como tecnología lítica de modo 1*, o *Olduvayense*, a sus vecinos y parientes. A pesar de que pensamos que las herramientas del *habilis* eran de un solo uso (servían para cubrir las necesidades del momento) todo lo anterior sugiere que estos hominos estarían ya muy cerca de procesar en sus cerebros un razonamiento consciente.



Herramienta típica de la tecnología de modo 1 conocida como Olduvayense (Wikimedia, CC BY-SA 2.5 Generic)

En septiembre de 2015 saltó una posible sorpresa en el mundo de los hominos. En el yacimiento sudafricano de Dinaledi se han encontrado⁽¹³⁰⁾ los restos de al menos 15 individuos, que se están catalogando como de una nueva especie: *Homo naledi*. Su estructura anatómica se encuentra, aproximadamente, entre la de los australopitecos y los hábils. El gran interrogante es que aún no ha sido posible datar su antigüedad y, por tanto, queda todo sujeto a la controversia y a futuros estudios.

Coetáneo de los *habilis* y los *Paranthropus*, el *Homo rudolfensis* habitaba también el este de África hace entre 2,4 y 1,8 millones de años. Sus fósiles indican unos individuos un poco más evolucionados que sus compañeros africanos, lo que parece que pudo ser así según los datos de su capacidad craneal, en el entorno de los 750 centímetros cúbicos. Sin embargo, el debate de su clasificación sigue completamente abierto, con la excitante cuestión de cómo debió ser la convivencia en el tiempo y en el espacio de tres especies diferentes de *Homo*. Desgraciadamente, ninguna de las tres pudo soportar la selección natural y se nos perdieron en el camino.

Quizás teniendo como antecesor a *Homo habilis* se pasó al también africano *Homo ergaster*, del que con el tiempo sus descendientes emigrarían a Eurasia muy tempranamente, quizás hace 1,8 millones de años. Posiblemente evolucionaron primero hacia el *Homo georgicus* en el Cáucaso y quizás a la par en Asia hacia el *Homo*

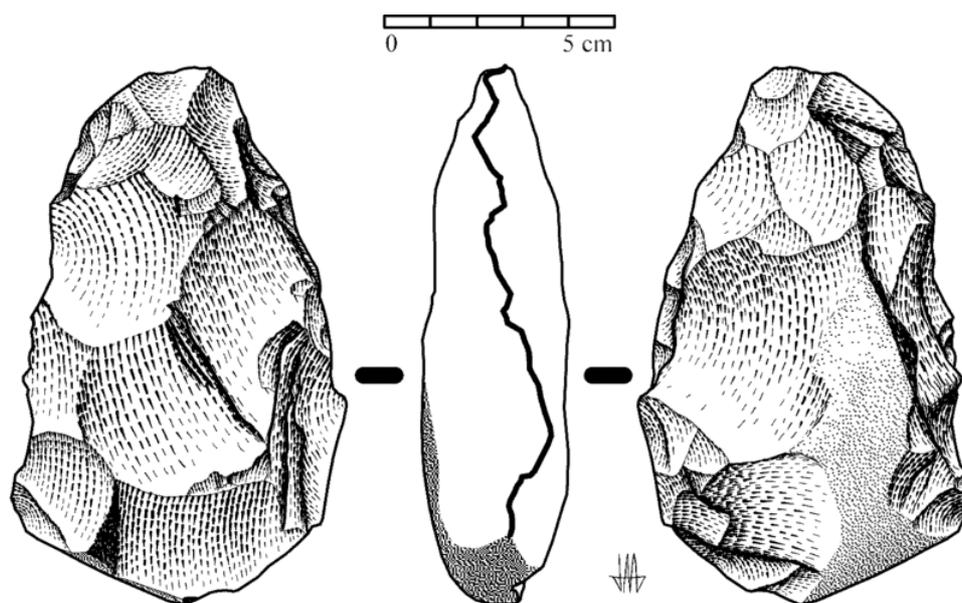
erectus y en Europa, quizás a través de *erectus*, hacia el *Homo antecessor*.

Pero centrémonos en *ergaster*. Nos encontramos en Kenia, África, en el entorno de hace 1,8 millones de años. Eran individuos muy robustos, con una estructura corporal perfectamente adaptada a la marcha pedestre, muy parecida a la del *Homo* actual. Habitados ya a los terrenos abiertos y secos, tenían una talla elevada, hasta 1,80 metros de media, y un dimorfismo sexual poco acentuado. El volumen craneal, aunque era muy variable según los especímenes fósiles encontrados, experimenta con ellos un importante salto cuantitativo en cuanto a su tamaño, alcanzando los 850 centímetros cúbicos, unos dos tercios del de nuestros cerebros. Parafraseando al antropólogo Juan Luis Arsuaga en su libro *“La especie elegida”*: *“...El Homo ergaster aparece ante nosotros como la más humana entre las especies primigenias del Homo”*. Sin lugar a dudas nos encontramos ante unos individuos que eran muy parecidos a los hombres actuales. Desgraciadamente, también se extinguieron hace 1,4 millones de años.



Niño de Turkana, esqueleto fósil de un niño ergáster de unos 12 años datado en 1,6 millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Pero nos hicieron un magnífico regalo. El *Homo ergaster* había desarrollado una nueva tecnología conocida como *cultura achelense*, o *industria lítica de modo 2*, que básicamente consistía en la fabricación y uso de *utensilios de piedra de doble filo*, como lo son las hachas, de todos los tamaños y con un acabado muy esmerado. Era un salto absolutamente cualitativo en la marcha del *Homo*, ya muy alejado de los hábils y no digamos de los olvidados australopitecos.



Herramientas de la cultura Achelense o tecnología de modo 2
(Wikimedia, dominio público)

En Asia encontramos a sus sucesores, los *Homo erectus*. Con una antigüedad considerable, entre 1,8 y 1,6 millones de años, tenemos los fósiles del hombre javanés de Sangiran o el cráneo encontrado⁽¹³¹⁾ en el yacimiento chino de Gongwangling. Más moderno y muy conocido es el Hombre de Pekín cuyos fósiles lo sitúan en hace alrededor de medio millón de años. Se sabe que vivía en cobijos preparados para ello, como cuevas, en donde se han hallado cenizas y carbón vegetal asociados a alimentos, como huesos de animales y semillas quemadas. Es evidente que no les asustaba el fuego, controlaban su manejo y al menos lo usaban para cocinar. Un indicativo de esto último es el tamaño de sus molares, que eran pequeños en comparación a su masa corporal: masticaban una comida muy fácil. En sus asentamientos se han encontrado miles de instrumentos líticos y de hueso ya muy especializados, como tajadores, rascadores, cuchillos, martillos, yunques, cavadores y algunas puntas. Es evidente que ahora hablamos ya de un *Homo* inteligente. Y no nos olvidemos del también asiático pequeño *Homo floresiensis*, una

evolución mucho más moderna del *erectus* (de hace 74.000 años), que se cree resultado del confinamiento geográfico de estos hombres en una isla.

En Europa encontramos a sus más antiguos descendientes en Dmanisi, situado en el Cáucaso, en la república de Georgia, conformando una nueva especie llamada *Homo georgicus*, cuyos fósiles se han datado en 1,8 millones de años. También en Europa y en los yacimientos burgaleses de Atapuerca, en España, se han encontrado fósiles de otra especie heredera de los *erectus*: el *Homo antecessor*. El primer vestigio se encontró en el nivel 6 de la cueva de la Gran Dolina y fue datado en 900.000 años. Más tarde en el nivel 9 de la Sima del Elefante aparecieron fósiles y utensilios de hace 1,3 millones de años.

Volvamos al ámbito africano. Allí continuó viviendo el *Homo ergaster* a pesar de sus migraciones. Entre él y el inicio de la especie de *Homo sapiens* hay una diversidad de fósiles, a veces no muy abundantes, que nos conducen a la idea de una época con muchas especies humanas conviviendo en el planeta. Los restos encontrados se atribuyen a especies encuadradas bajo un grupo general que Richard Dawkins calificó como “*homos arcaicos*” nomenclatura que todavía se usa. Sus anatomías no se consideran aún como la de los hombres *sapiens* modernos -nosotros- aunque sus capacidades craneales en algunos casos pudieron ser similares. Tienen hasta 600.000 años de antigüedad. Entre otros, podemos mencionar a *Homo heidelbergensis* (África y Europa), *Homo rhodesiensis* (África), *Homo neanderthaliensis* (Europa y Asia), el hombre de Denisova (Siberia) o el hombre del ciervo rojo (China).

A pesar de su evidente interés y popularidad no voy a profundizar en el mundo de los neandertales, ya que, aunque sabemos mucho de ellos (la paleoantropología ha estado históricamente muy centrada en Europa), no fue una especie especialmente particular desde el punto de vista evolutivo.

En el capítulo siguiente, que titularemos como “*La aventura viajera del Homo*”, veremos un poco más de su historia. Aquí comentaremos algunas de sus relaciones deducidas a partir de los estudios⁽¹³²⁾ de los genomas neánder, denisovano y sapiens moderno. Se cree que los dos primeros tuvieron un ancestro común hace unos 650.000 años, cuya rama se habría desgajado de la que más tarde devendrían los *Homo sapiens* un poco antes, hace 800.000 años. Se sabe⁽¹³³⁾ también que, a pesar de ser consideradas especies distintas, todas ellas se hibridaron y tuvieron descendencia fértil. De forma que los hombres modernos de fuera de África llevamos en nuestro genoma entre un 1 y un 4% del de los neandertales, y los modernos papúes, melanesios y aborígenes australianos

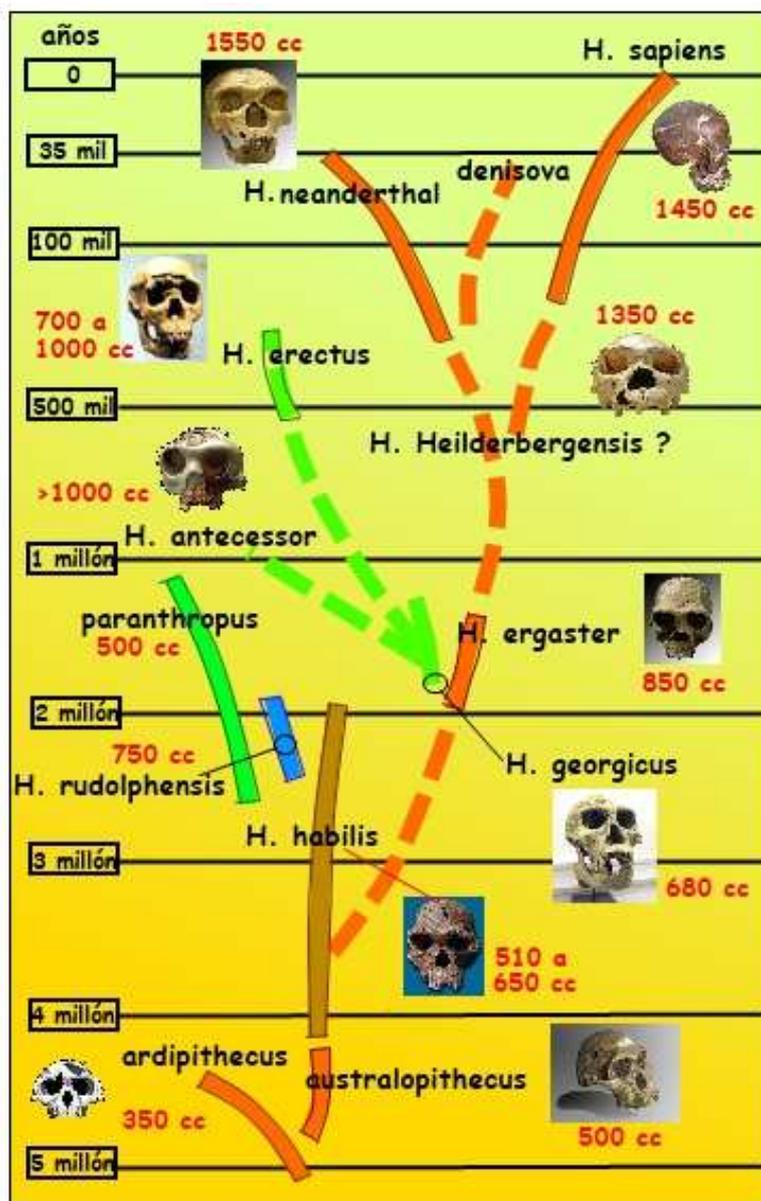
hasta un 4% adicional de genoma denisovano. Los encuentros se pudieron dar para los primeros, neandertales y sapiens, en una extensa zona geográfica centrada en el Próximo Oriente entre hace 65.000 y 47.000 años, y en el segundo caso⁽¹³⁴⁾, denisovanos y sapiens, más allá de la línea de Wallace (fosa marina entre Asia y Oceanía), cuando hombres denisovanos la cruzaron navegando para emparejarse con mujeres *Homo sapiens*.

También se ha podido saber que las dos especies primitivas, neánder y denisovas, pudieron hibridarse entre ellos, e incluso con una cuarta especie asiática de hace 30.000 años, de la que sólo tenemos evidencias⁽¹³⁵⁾ por fragmentos de su genoma. Para añadir más información a lo que parece un intrincado mundo de especies humanas en aquel momento, se ha publicado⁽¹³⁶⁾ la existencia de una posible nueva especie asiática, de hace unos 60.000 años, emparentada con *erectus* y neandertales. A todo ello podemos añadir una información muy interesante aparecida recientemente acerca de que el *Homo antecessor* de Atapuerca estaría sorprendentemente más relacionado genéticamente con los homínidos de Denisova que con los neandertales. Por fin, para completar con la lista de sorpresas, y no será la última, que últimamente abundan en el intricado arbusto de las especies humanas del Paleolítico euroasiático, volvemos a mirar al tesoro fósil de Atapuerca. En unos pocos metros cuadrados de un recóndito rincón conocido como la Sima de los Huesos se han encontrado restos fósiles de unos 28 individuos de todas las edades, con una antigüedad de 430.000 años. A pesar de coincidir en el tiempo con *Homo heidelbergensis*, y de ser así considerados por ahora, según otro estudio⁽¹³⁷⁾ publicado en la revista Science los homínidos de la sima de los Huesos encajarían en la especie neandertal mejor que en la especie heidelbergense.

Todo ello nos hace pensar que nos queda mucho por saber de las redes de evolución de los *Homo*'s, y a medida que los antropólogos profundicen sus estudios sobre zonas geográficas hasta hoy poco investigadas, como puede ser Asia, y que la genética nos abra un mayor abanico de datos, iremos comprobando que la historia de los hombres del Paleolítico superior no fue ni mucho menos lineal, sino más compleja, con especies muy dinámicas y fuertemente entrelazadas geográfica y genéticamente.

El colofón, por ahora, de este camino evolutivo se alcanza con la especie *Homo sapiens*, cuyos individuos ya poseen características anatómicas semejantes a la de los hombres actuales, los *sapiens sapiens*. Sus fósiles más antiguos son los del yacimiento de Omo I, llamados *Hombres de Kivis*, encontrados en Etiopía, con 195.000 años de antigüedad; los restos

de Herto también de Etiopía datados en hace 160.000 años y los fósiles de las cuevas del río Klasies en Sudáfrica, con 125.000 años. Es en esta especie, la *sapiens*, donde culminará el desarrollo de la habilidad que ha permitido al *Homo* dar su paso evolutivo final: el lenguaje plenamente articulado. Y, evidentemente, otras muchas habilidades más.



La foto de familia aún sometida a discusión, ¿cómo no? (imágenes de Wikimedia, dominio público, GNU FDL 1.2 y CC)

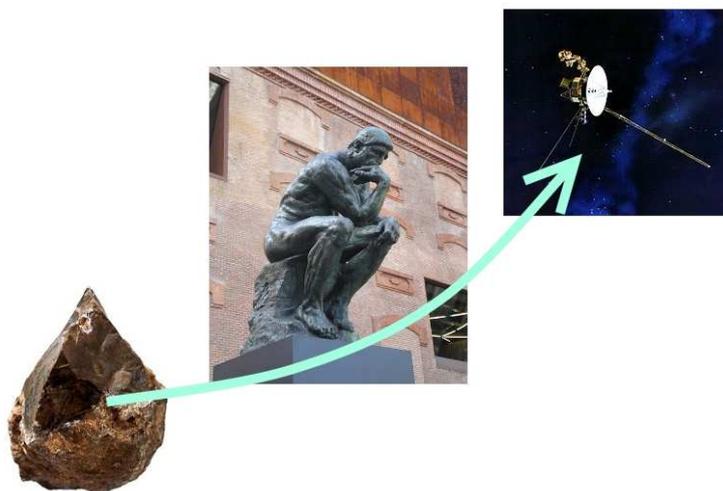
De él y de su historia de migraciones hablaremos en un posterior capítulo. El inmediato a éste la dedicaremos al análisis de lo que, según mi opinión, es la base que llevó a todas estas especies hacia la inteligencia y de cómo

se fueron consiguiendo el cerebro, el dominio de las abstracciones y la simbología y las relaciones sociales.

54. El corazón de la evolución humana

En el capítulo anterior habíamos acompañado a alguno de los primates de las selvas ecuatoriales africanas en su aventura de supervivencia, desde los *Homo* más ancestrales, los *habilis*, con los que se inició la tecnología, hasta el *Homo sapiens* dominando el continente euroasiático. El clima les había cambiado drásticamente el campo de juego, pero las nuevas reglas que precisó inventar para continuar su periplo evolutivo le llevó a un nuevo estado fundamental nunca visto: la consciencia que le hizo “humano”. Los avances tecnológicos fueron un acicate para el cerebro, y un cerebro más activo propondría explorar nuevas oportunidades. Al final llegó el gran premio de la inteligencia racional.

Siguiendo la cronología de nuestra particular biografía nos tocaría ahora ver cómo fue su aventura viajera desde el primigenio hogar africano. Pero eso lo haremos en un próximo capítulo. Porque en éste voy a introducir un nuevo paréntesis para focalizar el pensamiento sobre aquello que pudo haber originado el cambio evolutivo a partir del que emergió la consciencia.



Alegoría de la condición humana (imágenes de Wikimedia, CC BY-SA 2.5, 3.0 y dominio público)

El trabajo se me antoja hartito complejo y lo único que puedo pretender es proporcionar información para suscitar curiosidad, ya que este campo esta

lleno de suficientes hipótesis y opiniones, consecuencia lógica del gran vacío de datos directos que le acompaña: la consciencia no fosiliza. Aunque podemos imaginarla escondida en las manifestaciones culturales que estudia la paleontología.

Para empezar, nos deberíamos preguntar qué es lo que nos hace humanos. Personalmente me gusta definirlo de la siguiente manera:

Somos diferentes al resto de los animales porque somos conscientes de nuestra individualidad personal y somos conscientes de nuestro más próximo entorno. Ambos sentimientos conscientes los percibimos como realidades en sí mismas, cambiantes con el tiempo, y que somos capaces de comprender y manipular según nuestra voluntad con una potente habilidad personal que llamamos raciocinio.

Todo lo anterior está gestionado por una “máquina” física, nuestro **cerebro neuronal**, y su capacidad de actuación vía la actividad de sus redes de neuronas.

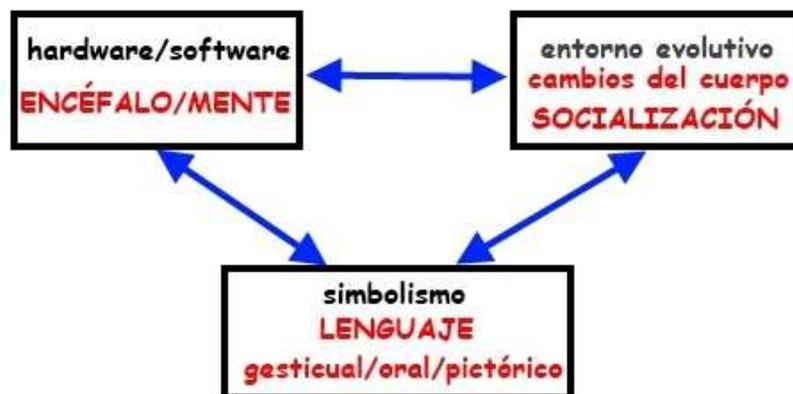
Pero lo anterior no surge espontáneamente. Lo que nos ha hecho distintos al resto de los animales ha estado sujeto a la terca realidad de la evolución. Gracias a la evolución, nuestra particular máquina de hacernos humanos ha sido capaz por ella misma de alcanzar unos estados de eficiencia en la gestión de la vida, tan sorprendentes en el contexto del resto del entorno biológico del planeta que el sentido de lo humano se ha hecho definitivamente “contundente”. Y no sólo me estoy refiriendo a la potencia de la inteligencia humana, sino también al nuevo mundo tecnológico del *Homo*.

Para ello, y pasito a pasito evolutivo, algún individuo de la línea de los primates (no creo equivocarme si tomo el amplio rango de los primates) consiguió sacar al exterior el proceso de razonamiento que se producía en el interior de su cerebro. El camino pasó por extraer la “base de datos” fuera de los propios circuitos neuronales mediante el uso de la **simbología**, que culminaría con el **lenguaje** y con la progresiva percepción de que en “el de enfrente” también existía una máquina mental con la que podía conectarse e interactuar. Con ello abría un campo inimaginable en el mundo de sus relaciones sociales, que con el apoyo del lenguaje se hicieron siquiera aún más trascendentales: se había pasado de la imitación a compartir el conocimiento.

No cabe duda de que hubo un condicionante decisivo que impulsó la inteligencia: las **relaciones sociales**, el intercambio de experiencias, la

pirámide acumulativa del conocimiento. Sin ellas, el individuo posiblemente hubiera tenido escasos estímulos para la mejora. Se había pasado del *impulso* a la *motivación* por alcanzar un ambiente vital más eficaz. Las posibilidades de una inteligencia que no pueda manifestarse en un mundo de relaciones quedan muy mermadas. De hecho se observa que los primates que desarrollan unas relaciones sociales más complejas son los que tienen un cerebro más grande. Los neurólogos lo explicarían muy bien: las redes neuronales necesitan ejercicio y las relaciones sociales son un buen *sparring*.

Lógicamente, ambos aspectos, encéfalo/mente y entorno social, se manifestaron cruciales en el salto hacia las culturas avanzadas y tecnologicadas. Una mayor capacidad para el manejo de los datos, que además son más intensamente compartidos, permitió el progresivo perfeccionamiento del conocimiento y su gestión. Su acumulación en el creciente acervo cultural de las sociedades y su aplicación, vía cambio de costumbres y de tecnología, fue decisivo para la mejora de la competitividad evolutiva de la línea primate que lo consiguió.

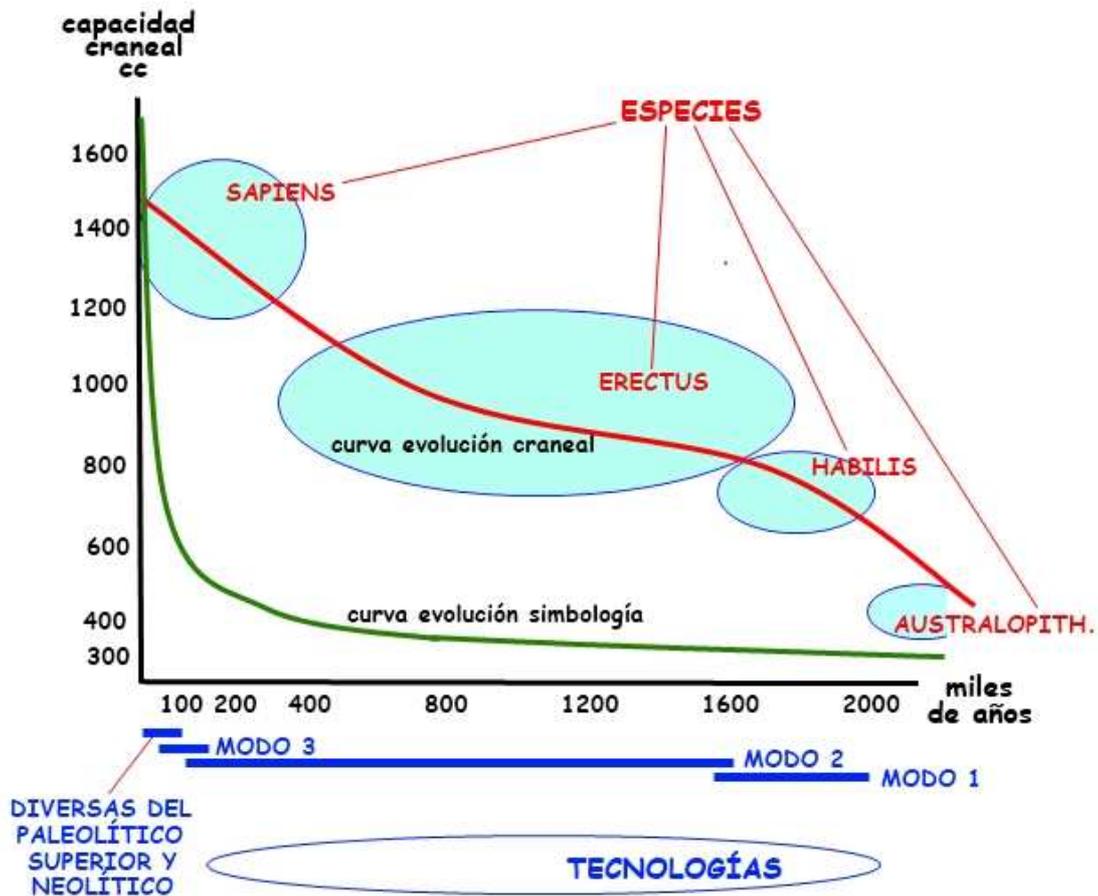


El pensamiento, la conducta y el lenguaje, triángulo del proceso psicobiológico que va a caracterizar la “condición humana”

En resumen: **Uno**, consciencia y razonamiento; **dos**, simbología y comunicación; y **tres**, relaciones sociales que amplificaban y hacían sólidos los avances. Lo “humano” y sus motores para el cambio.

Dicho lo anterior nos proponemos seguir su rastro a lo largo del tiempo. En una primera aproximación podríamos decir, como es lugar común en la mente de todos, que lo que nos hace humanos, la inteligencia, la capacidad de razonar, son alforjas que se van llenando poco a poco mientras el cerebro va evolucionando hacia mayores volúmenes y, por tanto, alcanzando mayor capacidad de procesamiento. Estúdiese cómo

evoluciona el tamaño craneal de nuestros fósiles y se obtendrá la senda de aprendizaje hacia lo “humano”.



Esquema a partir de la información del libro de Ángel Rivera Arrizabalaga “Arqueología del lenguaje”, que permite comparar los perfiles del ritmo evolutivo de la capacidad craneal, uso de la simbología y tecnologías del Homo. Se observa el desfase temporal entre el primero y los dos últimos.

Pero la realidad parece contradecir este axioma. Si analizamos conjuntamente, como se puede ver en la figura anterior, las evoluciones temporales del crecimiento del tamaño craneal, del avance de las culturas (tecnologías) líticas y de las evidencias sobre el uso de simbolismos, vemos que se ha producido un sorprendente desfase entre lo que suponemos obvio, un “avance cultural paralelo al tamaño de cerebro”, y lo que se observa en la realidad.

La realidad nos enseña que entre el crecimiento del volumen craneal y la manifestación de inteligencia vía los marcadores de cultura y uso de simbolismos hay un desfase de al menos cientos de miles de años. Muy

grande en el inicio, cuando los australopitecos y los hábils, y confundiéndose paulatinamente a medida que el *Homo* se va haciendo más *sapiens*. Esa observación nos afianza en la idea de que la consciencia inteligente no solamente surge de un fenotipo preparado para ella, sino que debe haber algo más. Ya apuntamos al principio que simbolismo y relaciones sociales debieron ser las otras dos patas de la mesa.

Por tanto, es claro que no era suficiente el tener una máquina adecuada, un hardware -encéfalo- estructuralmente capaz y un software -mente- potente. A esta máquina le hicieron falta miles de años de evolución inmersa en un medio con el que iba coevolucionando. Poco a poco, *acunada por los cambios fenotípicos del cuerpo hominino y por los cambios ambientales*, debieron ir apareciendo manifestaciones de una consciencia. Al principio poco elaborada, para acabar con la maravilla de la capacidad de raciocinio del *sapiens*. Este camino de progresiva emergencia tuvo que tener su reflejo en el comportamiento de los *Homo*'s, que a su vez tiene reflejo en los restos arqueológicos de su actividad, algunos de los cuales son accesibles para nosotros a través de las labores de la paleoantropología.

Este es el reto de la Arqueología Cognitiva: deducir de las evidencias fósiles el desarrollo de lo humano. Tarea multidisciplinaria donde las haya, en donde participan antropólogos, neurólogos, sociólogos, psicólogos, etnólogos, lingüistas...

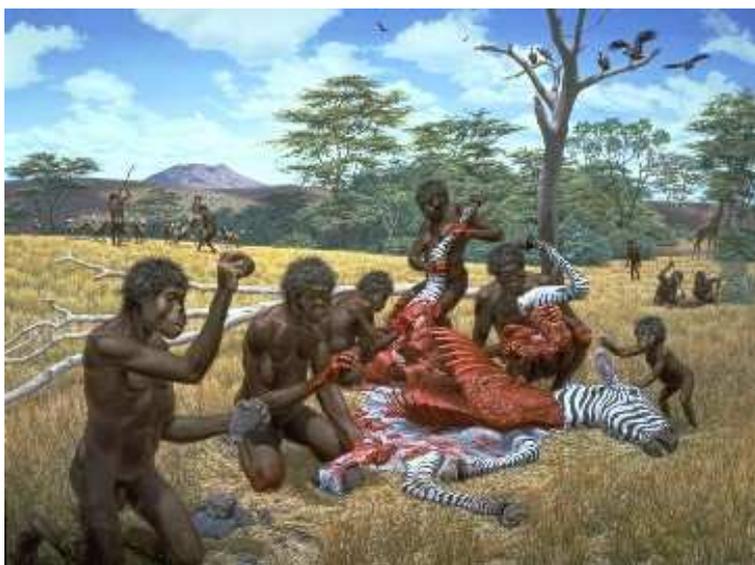
Son muchos los autores que postulan la hipótesis acerca de que el uso del **simbolismo es la luz de alerta de las capacidades cognitivas** que consideramos humanas. Es la manifestación clara de un pensamiento abstracto: exige un sentimiento de sí mismo y del "otro", un discernimiento del tiempo y el espacio, un código de traducción entre abstracciones del que piensa y comunica con el que recibe, reprocesa la abstracción y entiende al primero.

En resumen, perseguir la emergencia de la condición humana es tratar de seguir la evolución interrelacionada, por un lado, de las capacidades cognitivas (cómo evoluciona el cerebro), por otro, de las características del entorno (manifestaciones sociales y evolución morfológica), para acabar con el desarrollo del uso del simbolismo (herramienta imprescindible para transmitir el conocimiento, de forma que las relaciones sociales permitan su acumulación progresiva en el acervo de la humanidad, imprescindible para el desarrollo cultural).

El relato de esta historia es largo, y siento decir que se aparta del propósito de este libro. En cualquier caso, aquí propongo un relato cronológico sobre lo que creemos que pudo pasar en la realidad. Relato con cierto detalle, aunque, por ajustarme a las necesidades de longitud del escrito, pueda resultar simplista y compartimentado al buscar una mayor claridad esquemática. En la voluntad del lector, como en la de los más expertos teóricos, queda el ponderar en qué momento fue madurando hasta aparecer en el escenario lo que llamamos “condición humana”. Desgraciadamente es algo que no fosiliza, como comenté al principio de la entrada.

Comenzaremos con el *Homo habilis* de hace unos 2,5 millones de años.

Capacidad craneal de 650 centímetros cúbicos. Inventor de una tecnología lítica precaria, la Olduvayense o Modo 1. Carroñero y cazador esporádico. Sus grupos sociales son pequeños y se desplazaban al albur de la obtención de comida, en cuyo seno se intercambiarían por imitación las habilidades para la gestión inmediata del día a día. Poseían cierto sentido de la previsión, ya que se conocen lugares donde almacenaban la materia prima para sus herramientas, aunque éstas posiblemente fueran de un sólo uso. Fisiológicamente podrían dominar un lenguaje gestual e incluso fonético, aunque muy sencillo. Podemos deducir de todo lo anterior que comenzaban a comprender las abstracciones básicas relacionadas con los sentidos de unidad grupal, espacial o temporal, lo que nos lleva a pensar que el razonamiento de tipo humano ya estaba comenzando a emerger en sus cerebros, pero sin un pleno sentimiento consciente de lo que se hacía.



Representación de una horda de Homo habilis (Imagen: Jay Matternes, fair use)

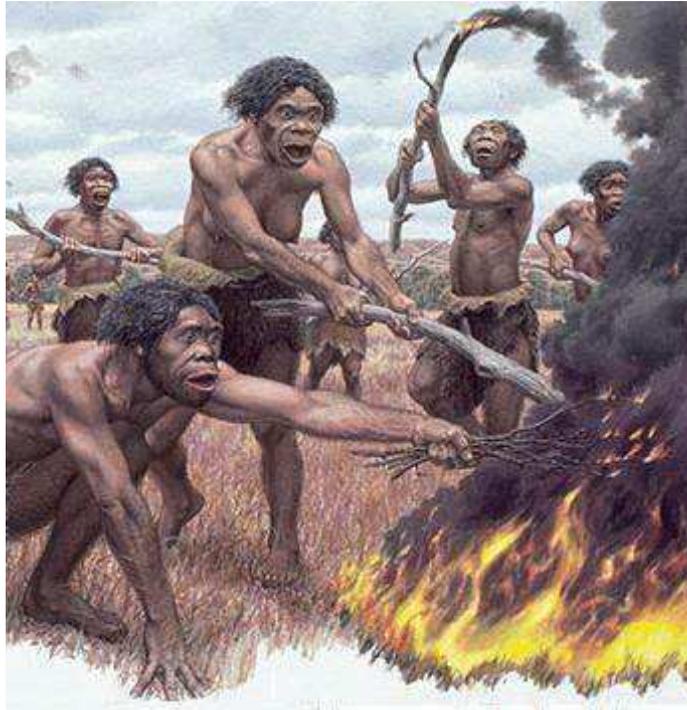
En el impreciso entorno entre 1,8 y 0,25 millones de años.

Una larga época en la que sucedieron muchas cosas desde el prisma de la fisiología y relativamente menos, a la vista de su extensa duración, desde el prisma de los usos y cultura. Fue una extensa época a lo largo de la cual vivieron una variada panoplia de especies homínidas, desde el *Homo ergaster-erectus* hasta el nacimiento del *Homo sapiens*. Fue también la época en la que el hombre salió de África por primera vez, colonizando Eurasia. Todos aquellos hombres tenían una estructura corporal muy semejante a la moderna, aunque sus capacidades craneales pasaron de los 870 centímetros cúbicos hasta poco más de los 1.000, crecimiento que no afectó principalmente al córtex prefrontal cerebral, lugar donde se gestionan las habilidades superiores del razonamiento humano. Muy al inicio del periodo se produjo un salto tecnológico significativo, al practicar la talla de doble cara del canto rodado, lo que se conoce como tecnología Achelense “bifaz” o del Modo 2, que perduró sin una evolución significativa a lo largo de este millón y medio de años.

En la segunda mitad del periodo habrían afianzado el manejo de la abstracción identitaria de tipo social, puesto que comienzan a observarse asentamientos fijos, la socialización del fuego, unas claras estrategias de caza en grupo, como el uso de enceladas, y los primeros petroglifos y figurillas antropomórficas como posible señal de identidad territorial y de grupo. No se conoce ningún tipo de adorno ni sustancia colorante de uso personal que apoye el manejo de la abstracción de tipo identitario individual. En este sentido podemos imaginar también que de alguna manera el salto tecnológico implicaría algún tipo de reconocimiento individual de los artesanos. También podemos intuir en las siguientes circunstancias indicios que parecen apuntar hacia un manejo habitual de la abstracción espacial, aunque a corta distancia. Entre otras: las técnicas de caza, que implicaban la planificación de las celadas sobre los animales; los movimientos necesarios para llevar a cabo los contactos entre las distintas bandas que formaban el grupo reproductor; las evidencias de lugares de almacenamiento de alimentos o la búsqueda de material para sus herramientas lejos de sus lugares de habitación.

Al haber emigrado a zonas geográficas con una mayor diferencia entre estaciones -Eurasia- estaban obligados a discernir en qué momento había que recolectar determinado fruto o en qué momento la caza acudiría a sus lugares habituales. Todo ello indica una familiarización con el sentido de abstracción temporal, aunque fuera a corto plazo. Estamos hablando de que debían manejarse con soltura en una zona geográfica relativamente

próxima, en donde conocerían y podrían describir todo lo que quedaba en su interior con un horizonte temporal que debía abarcar varias estaciones.



*Un grupo de Homo ergaster/erectus aprendiendo a dominar el fuego
(Imagen: Jay Matternes, fair use)*

Fisiológicamente estaban bastante bien preparados para modular un lenguaje fonético, aunque acotado por las propias limitaciones del nivel de abstracciones con las que trabajaban sus mentes. Al interiorizarse este lenguaje más rico se fue perfeccionando la capacidad de pensamiento y de intercomunicación con los otros del grupo, a nivel descriptivo de un entorno que sobrepasaba el aquí y el ahora. Sin embargo, a la vista de estas particularidades, aún no habían llegado a niveles de reflexión suficientes como para que hubiera emergido el raciocinio complejo del hombre moderno.

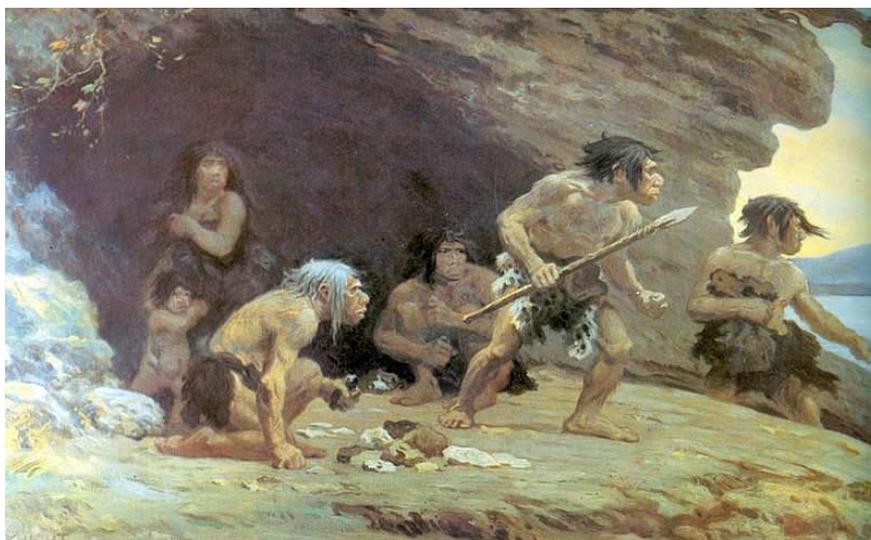
Aproximadamente desde hace 250 mil a los 40 mil años antes de hoy.

Coexisten varias especies de hombres, aunque es el momento en que empieza el itinerario del *Homo sapiens*. Es la época en que a partir de África este último se dispersa por toda Eurasia y hasta Australia, lo que conllevó el declive del resto de *Homo*'s. Con una capacidad craneal muy por encima del litro y un neocórtex prácticamente desarrollado, tenía la maquinaria suficiente como para que a partir de ellos emergiera con toda plenitud la conciencia reflexiva humana, o lo que es lo mismo, lo que

consideramos condición humana. La tecnología lítica dio un nuevo salto pasando a la más sofisticada técnica Musteriense o de Modo 3, de gran eficacia en el uso de la materia prima y con una gran diversidad de productos.

Todo parece indicar que los grupos humanos en África estarían mejor comunicados, mientras que en Europa, al ser las variaciones climáticas más intensas, incidirían en gran medida sobre las condiciones de habitabilidad en regiones próximas, lo que las conformaría algo así como islas geográficas a efectos de interacciones sociales de los grupos de población establecidas en ellas. Quizás por ello en África se observa un desarrollo cultural adelantado en el tiempo al que se aprecia en los yacimientos europeos.

Las habitaciones estables y el uso del fuego se van generalizando. Al menos entre los homínidos de África se aprecian unos cambios en las estrategias de obtención de los alimentos que indican una mayor planificación de las actividades y el aprovechamiento de los recursos marinos. Aparece tímidamente alguna evidencia de adornos corporales, ya sea por el uso del ocre decorativo o de objetos para este propósito. Aparecen los primeros enterramientos, aunque los expertos dudan de que tuvieran un propósito más allá de una práctica higiénica o de reconocimiento emocional a determinados personajes.



*Grupo de neandertales durante el periodo Musteriense
(Wikimedia, dominio público)*

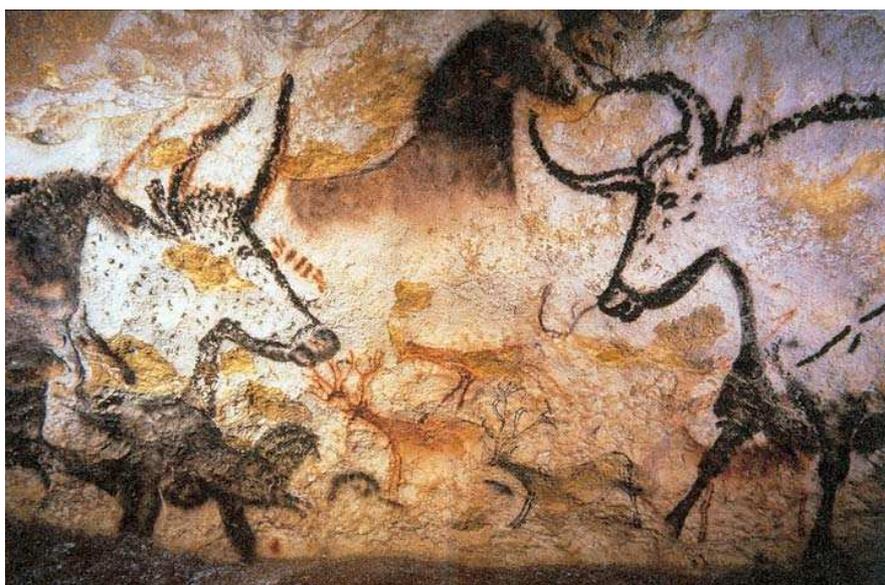
A partir de todo lo anterior podemos intuir cómo el sentimiento abstracto de grupo se habría intensificado, aunque la escasez de adornos nos hace

pensar que aún no era necesario fortalecer el sentimiento abstracto de autoconciencia individual, aunque sí se reconocería lo “especial” de algunos miembros del clan. Las abstracciones espacial y temporal, que ya vimos que comenzaban a manejarse con soltura en el periodo anterior, se iban reforzando gracias a la convivencia entre diversas especies y las fuertes relaciones que debían permanecer entre iguales tras unas migraciones tan rápidas como las que se habían producido. El espacio se habría hecho lejano y el tiempo, más que anual.

Dado que ya se disponía de una fisiología preparada para un lenguaje moderno y que se manejaban las abstracciones fundamentales con bastante agilidad, los expertos en Arqueología Cognitiva piensan que aquellos hombres se comunicaban con un rico lenguaje, aunque simplemente con fines descriptivos, con unas capacidades planificadoras y de anticipación que tendrían su reflejo en el proceso de pensamiento. Podríamos decir que aquellos hombres eran inteligentes, aunque sólo para la supervivencia. En ellos aún no había surgido la reflexión necesaria con la que aprovechar las potencialidades racionales de sus cerebros.

La fase crítica: desde el entorno de los 40.000 a los 10.000 años.

El registro fósil nos indica que en la frontera temporal de hace 40.000 años, y en un corto periodo de tiempo, se inició un cambio sustancial en el comportamiento cognitivo y conductual del hombre. Se observa tanto en África como en Eurasia. Es la era de consolidación del *Homo sapiens*.



Manifestación del arte rupestre de las cuevas de Lascaux, Francia, con 14.000 años de antigüedad (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Comienzan las manifestaciones artísticas con su máxima expresión en las pinturas rupestres, las habitaciones son cada vez más estructuradas, observándose cómo se utilizan de forma recurrente, y comienza la proliferación de adornos personales y de ajuar doméstico. La tecnología del tallado se sofisticaba con la introducción del uso del hueso o de la madera. Las herramientas producidas son muy variadas. Se va lejos a buscar las materias primas más idóneas y se llevan los productos manufacturados a lugares distantes de los centros de producción. Las técnicas de caza se sofistican también. Los enterramientos tienen ya una clara motivación trascendental.

La geografía empieza a estrecharse, ya que las relaciones entre grupos se hacen muy intensas. Comienzan las rutas de intercambio de bienes. La cultura ya no es puntual, sino que comienza a ser patrimonio de unos muchos que comparten conocimientos, con lo que se inicia tímidamente el edificio del saber universal.

Posiblemente esta circunstancia era la que estaba esperando el cerebro del *Homo sapiens*, que a nivel estructural ya sabemos que estaba prácticamente desarrollado como el de los hombres modernos, para iniciar el “gran salto adelante”. Ello se estaba produciendo a la par que se iba perfeccionando el lenguaje, al haberse ampliado el acervo común de simbolismos, con el valor añadido de las nuevas abstracciones inmateriales y trascendentales que estaba “descubriendo” la emergente reflexividad: metafísica, magia o religión. Así era el lenguaje que interiorizó la mente, con el que enriqueció su potencia de razonamiento.

Al final del periodo todas estas circunstancias alcanzan un nivel tal que el pensamiento de aquellos hombres debía ser ya plenamente verbal y con un rico manejo de variadas abstracciones. No sólo las tres clásicas de identidad social e individual, de tiempo y de espacio, sino también, como hemos comentado en el párrafo anterior, otras de tipo más trascendental. Se abrían las puertas del pensamiento simbólico, consciente y reflexivo.

A partir de ahí quedó al descubierto todo el potencial implícito en la capacidad y especialización neuronal del cerebro desarrollado de aquellos hombres. Pensamiento y lenguaje habían alcanzado el poder de la argumentación, que les posibilitaba la discusión crítica y razonada sobre las propias vivencias. Se vivía ya en la antesala de la forma de conducta plenamente simbólica, reflexiva y voluntariamente maleable propia del *Homo sapiens sapiens*.

A partir de hace unos 10.000 años.

Se domestican los vegetales y los animales. Y poco más hay que decir. Fue la circunstancia definitiva que necesitaban nuestros *Homos* de pensamiento reflexivo y maleable. Con la agricultura y la ganadería se fija la residencia, se generan excedentes, se asienta el comercio y la escritura. Parte de la población puede alejarse de los procesos productivos directos: se establece la política, lo militar, el pensamiento filosófico, los chamanes y el arte en todas sus facetas. El final tecnológico de la historia es bien conocido.

A lo largo de este capítulo hemos podido asistir a la evolución en unos animales muy particulares, desde una mente humana focalizada en la supervivencia hasta otra autoconsciente, reflexiva y maleable, que incluso fue capaz de “inventar” e incorporar al núcleo de su existir unas abstracciones ausentes en la naturaleza, como la idea de un mundo donde los que se habían ido pervivían o donde los dioses manejaban sus vidas. A partir de la llegada de estos individuos al teatro de la Vida ya nada será igual. La especie humana maneja las reglas del juego: la selección natural no será ya la única clave. El *Homo* ha inventado la selección tecnológica, la selección cultural y la selección social mediante las que fuerza la consideración de otros criterios en la lucha evolutiva. Hasta él se premiaba la supervivencia de los mejor preparados para la reproducción. A partir de él, cualquiera al que el destino le haya proporcionado medios y posición social puede tener comparativamente más éxito en el apareamiento, procreación y cuidado de la prole, sea cual sea la fortaleza de su patrimonio genético.

En el capítulo que sigue retomaremos el relato temporal para ver cómo estos hombres fueron capaces de repoblar cualquier espacio vacío del planeta.

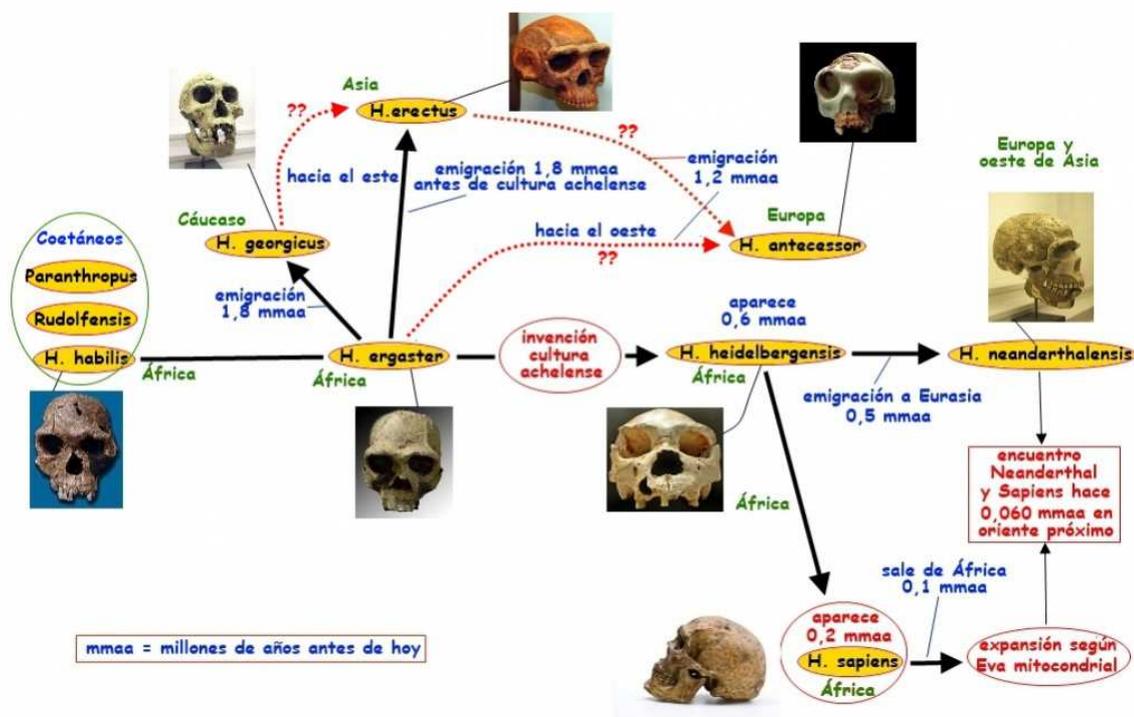
55. La aventura viajera del Homo

En el capítulo anterior habíamos abierto un paréntesis para desarrollar, de forma absolutamente esquemática, cómo los homínidos del Cuaternario alcanzaron la condición plenamente humana, como creemos que es la nuestra. La autoconciencia reflexiva, planificadora y previsor. Volvemos ahora al relato cronológico, hilo conductor de esta biografía sobre la Vida, para hablar de cómo los *Homo's*, saliendo de su lugar de origen, lograron poblar el planeta.

¿Cómo se desarrolló la aventura? Debió ser muy compleja, según lo que se conoce hasta ahora a partir de las evidencias fósiles, mediante las que podemos colegir variados esquemas que dibujan los posibles caminos migratorios. Hay que decir que nada hay definitivo, ya que todo queda sometido a lo que los futuros hallazgos y consiguientes estudios paleontológicos determinen. A partir de lo que se habló hace dos capítulos ya sabemos que los homínidos, una vez desgajados de sus antiguos compañeros de viaje orangutanes, gorilas y chimpancés, aparecieron en el continente africano en el este de su franja ecuatorial. Pensamos que el camino evolutivo los llevó a través del espacio y el tiempo, conviviendo con otras especies, hasta el *Homo habilis* y de él al *Homo ergaster*.

Hace unos 1,8 millones de años se debió iniciar lo que creemos fue la primera salida conocida del *Homo* fuera de África. Se supone que unos individuos que pudieron ser *ergaster*, o incluso evolutivamente anteriores, emigraron hacia el noreste siguiendo la falla del Rift llegando a atravesar el puente de unión entre África y Eurasia. Se establecieron rápidamente en el Cáucaso, Dmanisi, en donde recientemente se han encontrado fósiles que se han catalogado como de la especie *Homo georgicus* y datados precisamente en las fechas de la migración, unos 1,8 millones de años. Unos pocos miles de años más tarde, o quizás a la par de la aventura del Cáucaso, cuando el *ergaster* aún no había evolucionado su cultura lítica olduvayense hasta la más desarrollada achelense, se pudo producir de nuevo un desplazamiento geográfico de individuos de esta especie hacia el Próximo Oriente. Llegaron hasta el sureste de Asia, en donde evolucionaron hacia la nueva especie *Homo erectus*. Más tarde, hace 1,2 millones de años, los mismos *erectus*, o quizás de nuevo los *ergaster* africanos en un tercer movimiento migratorio, se desplazaron hacia

Europa, en donde hemos encontrado fósiles de sus descendientes (yacimientos de Atapuerca, España) que se han catalogado como de una nueva especie: *Homo antecessor*.

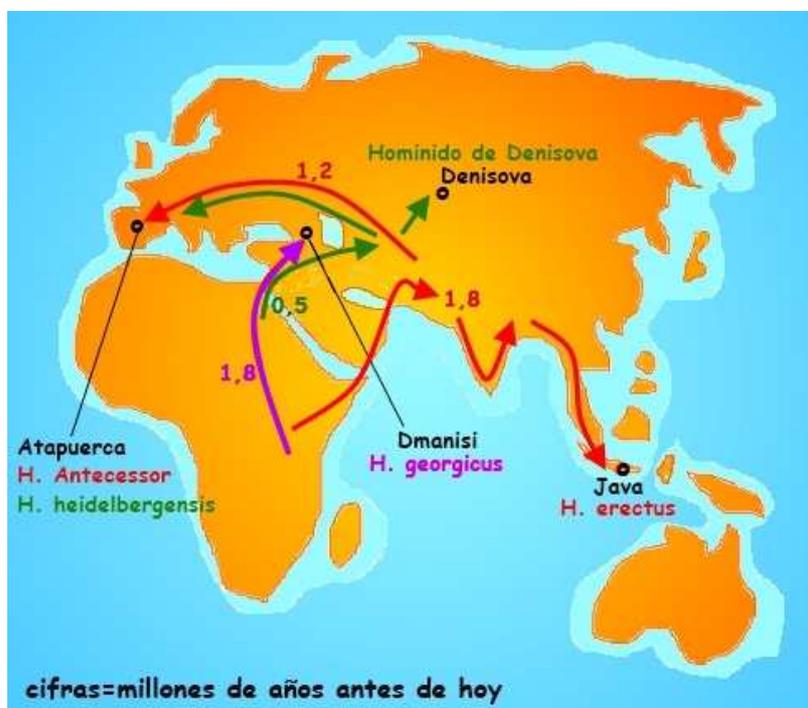


Esquema de las posibles migraciones del Homo, sujeta a incertidumbres interpretativas y lógicas modificaciones según avanza el conocimiento paleoantropológico

¿Por qué este afán viajero en aquel momento? ¿Se dieron unas circunstancias climáticas durante las cuales los recursos menguaron? A pesar de que la población era escasa en aquella época, cosa que ya sabemos de lo leído en otros capítulos, pudiera ser que la escasez de alimentos motivara el cambio de asentamientos. La coyuntura coincide con el periodo glacial Donau (1,8 millones de años) por lo que en aquellos momentos se estaría viviendo un clima condicionado por una atmósfera más seca. Las praderas africanas se habrían desertizado, trasladándose a latitudes superiores. Al haberse incrementado los depósitos de nieve y hielo habrían quedado al descubierto los pasos marinos entre África y Asia, permitiendo el tránsito a pie enjuto entre ambos territorios. Se sabe que el movimiento por Asia se hizo de forma muy rápida, ya que en pocos miles de años habían llegado hasta la isla de Java. A razón de un kilómetro por año lo pudieron conseguir en 15.000 años. Por ello parece plausible pensar que a medida que el clima del momento iba empobreciendo los lugares

habituales de vida, paulatinamente se fueron desplazando desde África hasta Asia. Lo harían siguiendo los movimientos de las manadas de grandes animales que también eran empujados por la búsqueda de vegetales sustitutivos de los habituales en sus dietas, a través de una amplia franja geográfica más septentrional pero de características no muy diferentes a las que habían sido las ordinarias en sus puntos de origen.

Mientras, en África, el *Homo ergaster* que había permanecido allí siguió evolucionando hacia unas nuevas formas conocidas como *Homo heidelbergensis* y *Homo rhodesiensis* y a una nueva cultura de talla lítica más evolucionada, la achelense. Se cree que unos individuos de alguna de estas últimas especies de *Homo* viajaron hacia Eurasia por los mismos caminos anteriores, en un nuevo desplazamiento geográfico hace medio millón de años, durante la *glaciación de Mindel* cuando el hielo alcanzó su mayor extensión. Allí evolucionaron hacia nuevas especies: *Homo neanderthalensis*, el homínido de Denisova y posiblemente⁽¹³⁸⁾ aún una tercera especie más, de la que sólo se tienen indicios por su genoma. Se cree que los heidelbergenses que quedaron en África fueron los precursores de *Homo sapiens*. Allí precisamente se encuentran sus primeras evidencias datadas en hace unos doscientos mil años. Con ellos se inició una nueva fiebre repobladora.



Esquema aproximado de lo que pudieron ser las primeras migraciones del Homo fuera de África

La expansión de la nueva especie *Homo* se inició desde algún lugar del África oriental hace entre 160 y 135.000 años. Las primeras radiaciones fueron para poblar el continente hacia la cuenca del río Congo, Golfo de Guinea, Sudáfrica y el altiplano de Etiopía. Poco después, en el entorno de hace 125.000 años, se vivió un periodo interglaciar durante el cual la atmósfera se hizo más húmeda y cálida. El resultado fue que el Sáhara se convirtió en un vergel por donde los *sapiens* de Etiopía se desplazaron descendiendo por el valle del Nilo. Algunos colonizaron la costa norte africana mientras que otros salieron del continente por la vía del Sinaí llegando al Próximo Oriente en el este mediterráneo, donde se asentaron. Más tarde, hace unos 115.000 años, el clima volvió a cambiar al aparecer una nueva *glaciación*, la *de Würm*, que secó la atmósfera devolviendo de nuevo al norte de África unas condiciones desérticas.

Los *Homo's* que vivían en el levante mediterráneo quedaron allí atrapados entre el frío del norte y la sequía del sur. Y desaparecieron. En la cueva de Qafzej y en Skhul (en territorio del actual Israel) se han encontrado enterramientos humanos de hace unos cien mil años. Su lugar fue ocupado por una especie mejor preparada para condiciones de bajas temperaturas: vinieron del norte y eran los neandertales. Pero no todo debió ser malo para los *sapiens* ya que el esplendor de los glaciares de esta última glaciación una vez más había hecho descender el nivel de las aguas marinas, lo que abrió pasos firmes entre África y Asia a través del mar Rojo y el sur de Arabia. Por estos puentes terrestre el *Homo sapiens* inició, en el entorno de hace 100.000 años, la colonización del sur de Asia siguiendo la costa y viviendo de los productos que les proporcionaba el mar. Se conocen algunas de sus pistas encontradas en yacimientos del sur de China: una mandíbula de 110.000 años en la cueva de Zhiren que correspondería a *sapiens* con ciertas características arcaicas. Y lo que es más sorprendente, medio centenar de dientes con una morfología que corresponde a individuos *sapiens* modernos, con una antigüedad de entre 120 y 80 mil años, en la cueva de Fuyan en Daoxian. Su descubrimiento reportado⁽¹³⁹⁾ en 2015 ha suscitado grandes preguntas ya que quizás el *Homo sapiens* moderno abandonó África antes de lo que se pensaba. Bien pudiera ser que todos los hombres modernos que actualmente vivimos fuera de África provengamos de alguno de estos pequeños grupos aventureros.

El clima del Pleistoceno siguió con su perfil de montaña rusa, de forma que hace 52.000 años hubo un nuevo repunte de la temperatura global con un incremento de entre siete y diez grados. Parece que desde Asia, en territorios que actualmente son el norte de India y Pakistán, los humanos modernos se dirigieron rápidamente hacia Europa. En los

Balcanes hay asentamientos de más o menos 45.000 años de antigüedad, como el búlgaro de Bacho Kiro. Tardaron muy poco en llegar al extremo occidental europeo, a la península Ibérica (yacimientos catalanes de L'Arbreda y del Abric Romaní de 40.000 años de antigüedad), y a la mayor parte del Asia climatológicamente habitable (llegan a Australia hace más de 40.000 años). Habían puesto un definitivo pie en Eurasia.

Las pistas genéticas

El camino migratorio que dibuja el rastro fósil ha podido ser analizado con más exactitud a través de técnicas de análisis genéticos. Ésta es la historia de la **Eva mitocondrial**.

Cuando en los primeros capítulos de esta serie nos asomábamos a las células y su aventura hacia formas complejas que dieron como resultado las eucariotas con núcleo, hablábamos de las mitocondrias, auténticas factorías celulares en donde se gestiona su infraestructura energética. Y también decíamos que las mitocondrias eran los vestigios de alguna bacteria en simbiosis con otra célula procariota hospedante. La mitocondria ha logrado mantener parte de su original acervo genético, que se transmite de generación en generación **de las madres** a sus descendientes, sin mezclas ni divisiones -los espermatozoides paternos no transmiten sus mitocondrias al gameto-. Sólo de vez en cuando se produce un cambio en forma de alguna alteración de un nucleótido en uno de sus genes, una mutación que perdura en el tiempo. Los genes mitocondriales no están sometidos a recombinación durante la meiosis de los gametos, como les sucede a los del ADN nuclear. Así pues, **como conjunto** son “eternos”, mientras que los nucleares no, ya que se transmite a la descendencia mezclando el de madres con el de padres. De aquí que resulte más claro realizar cualquier rastreo sobre la historia de los genes mitocondriales, pues siempre son los mismos “personajes”, que sobre los del ADN nuclear.

Y esto es lo que se ha hecho con los de los Homo's. El rastreo nos ha llevado aguas arriba hasta una madre común a todos los hombres, madre que se los pasó a sus hijas, que a la vez lo hicieron con las suyas y así hasta hoy. A esta madre es la que simbólicamente se le ha bautizado con el nombre de *Eva mitocondrial*. El trasfondo del nombre *Eva* es esencial en este concepto ya que se trata de *una única madre ancestral de todos los humanos actuales*. Y esto no quiere decir que en

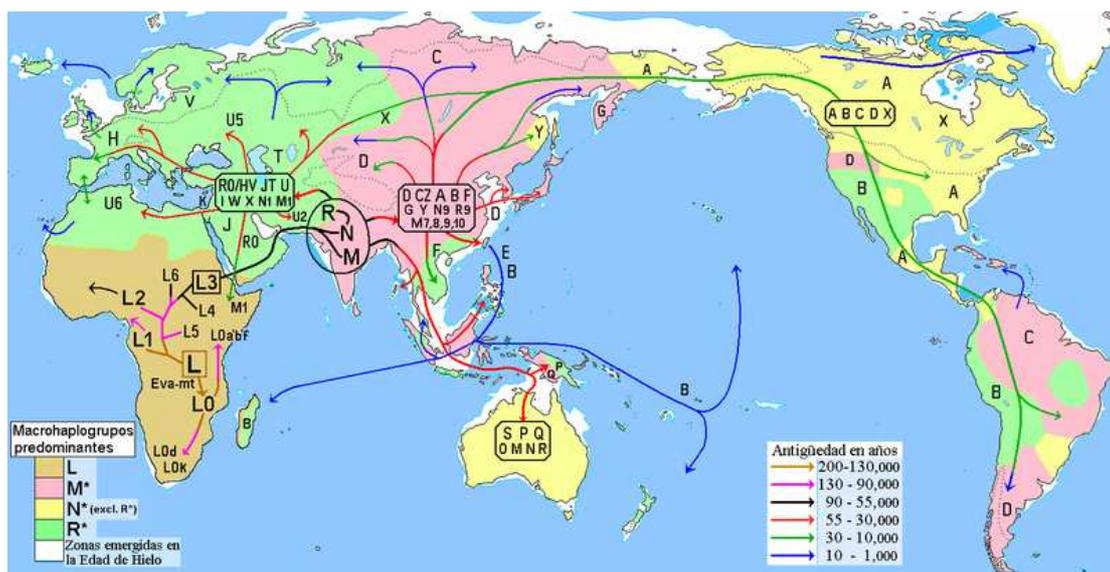
su época sólo existiera esta mujer, quiere decir que las otras mujeres, en sus árboles de gestaciones, llegaron en algún momento a tener sólo hijos varones o hijas sin descendencia, es decir se cortó la vía madre-hija de transmisión genética mitocondrial.

El rastreo hacia atrás en el tiempo se basa en lo que llamamos el *reloj biológico molecular*, que es algo sustentado en la sorprendente, a primera vista, propiedad de que las mutaciones en cada tipo de gen se producen en el tiempo *con una frecuencia media constante*, igual a la que se precisa para extenderse esta mutación a toda la población.

La consecuencia práctica es que si se analiza un gen determinado, el mismo, en una población de caucásicos y en una población de indios americanos, por ejemplo, y se determina el número de mutaciones en las que se diferencia el gen en ambas razas, se puede deducir el número de años hacia atrás en que se inició su divergencia genética, o lo que es lo mismo, el número de años atrás en que vivió el ancestro común. Simplemente como un ejemplo aclaratorio supongamos que el ritmo de mutaciones en este determinado gen en estudio es de una cada 50 mil años y que el análisis genético ha dado una diferencia entre ambas razas de 2 mutaciones. Está claro que estamos hablando de 100 mil años (50.000×2), pero que al haberse producido a lo largo de dos caminos desde un punto de bifurcación común, este momento inicial se encuentra en el punto medio del periodo, es decir, en hace cincuenta mil años. Y al igual que se puede rastrear el tiempo, se puede rastrear las relaciones territoriales y por tanto la geografía del origen.

Dicho lo anterior, que no deja de ser un simple ejemplo teórico, complemento la información con el parámetro que es utilizado en algunos análisis técnicos⁽¹⁴⁰⁾ y que corresponde a una tasa de mutación del ADN mitocondrial humano en el entorno del 2-4% por cada millón de años. Tengo que decir también que las tasas de mutación del genoma mitocondrial son especialmente elevadas, quizás consecuencia de su pasado bacteriano.

Hay que aclarar que hay que seleccionar para su estudio, de entre todos los genes, aquellos que son “transparentes” a la selección natural. Es decir, aquellos que, aun mutando, estas mutaciones son indiferentes a la selección natural de forma que ni se favorecen ni se eliminan, con lo que su ritmo de mutación es muy independiente y queda marcado por una cadencia temporal más o menos uniforme.



Migraciones del Homo sapiens y zonas dominantes de determinadas familias de alelos de acuerdo a estudios genéticos mitocondriales
(Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Ésta es la técnica, y con ella se ha establecido, analizando genes mitocondriales, que la Eva mitocondrial vivió aproximadamente hace 150 mil años en África. Dato que apoya fuertemente la tesis de que el primer *Homo sapiens* surgió en este continente hace entre 200 y 100 mil años (evidentemente el análisis se ha hecho sobre genes de hombres actuales, todos de la especie *sapiens*).

El mapa anterior resume el resultado de los estudios genéticos realizados con las técnicas y propósitos anteriores. Las letras mayúsculas son la nomenclatura que representa a los principales alelos de genes mitocondriales estudiados.

El grupo de genes, *halogrupo*, mutantes más ancestral es el LO, con unos 150 mil años y que es muy común entre los bosquimanos y demás grupos del **África** oriental. Sus mutaciones se difundieron por el resto de África. La tercera generación, los L3, salieron del continente hace unos 65 mil años y se dirigieron con gran probabilidad hacia la India formando allí el núcleo germinal que pobló el resto del mundo. Como ya hemos comentado anteriormente, es probable que desde el Cuerno de África pasaran por un istmo temporal que cerraba el estrecho Bab el-Mandeb hasta el actual Yemen, llegando luego a la India. Desde allí, las siguientes mutaciones se diversificaron hace entre unos 50 y 40 mil años, en tres direcciones. La sur que llegó por Indonesia hasta **Australia**, con extensiones hace unos cinco mil años hacia las islas de Polinesia, islas asiáticas del Pacífico, excepto

Japón, y la africana Madagascar. La ramificación del este se dirigió al **Asia** oriental en donde mutó de nuevo desplazándose más tarde una rama hacia el norte de forma que atravesó el Puente de Beringia hacia **Norteamérica** hace unos 15 mil años –y a través del istmo de Panamá, mucho más tarde, hasta Sudamérica- y que también con posterioridad pobló Siberia. La tercera ramificación se dirigió hacia el Próximo Oriente, donde volvió a mutar radiando hace unos 45 mil años hacia toda **Europa**, ocupando el terreno del norte a medida que se retiraban los hielos, y también emigró hacia el norte de África ocupando el Magreb y de vuelta hacia Etiopía, vía la península arábiga.

Esto es lo que dicen los genes mitocondriales.

Diversos estudios⁽¹⁴¹⁾⁽¹⁴²⁾ hechos a partir de los genes del cromosoma Y humano -en particular del haplogrupo A y en concreto el A1a-, que se transmiten exclusivamente de padre varón a hijo varón, llevan prácticamente a la misma conclusión. Tengo que apuntar no obstante que alguna de las últimas publicaciones⁽¹⁴³⁾⁽¹⁴⁴⁾ sobre el tema cuestionan esta idea al retrotraer el origen de un linaje “protosapiens” a fechas mucho más anteriores. Vamos a explicar la aparente contradicción.

Dicho haplogrupo A se había considerado desde siempre como la rama más antigua de los patrilinajes humanos, sin embargo se ha demostrado que incluye también evoluciones un tanto raras y ancestrales: la A1a, la A0 y la rarísima A00, todas ellas con un origen en hace unos 380.000 años, más antiguas que la A incluso. Es decir ¡que serían muy anteriores a la fecha de aparición del *sapiens* dictada por el genoma mitocondrial! Sin embargo en un estudio⁽¹⁴⁵⁾ del año 2011 realizado por el biólogo Michael F. Hammer y colaboradores se sugiere, apoyándose en evidencias muy plausibles, que estos haplogrupos tan raros podrían ser consecuencia de alguna hibridación con especies de hominos africanos pre-*sapiens*, no muy lejanos al *Homo sapiens*. Al excluir de la “pureza” evolutiva a las ramas A1b y A0, los biólogos consideran que se puede permitir el mantener el criterio científico que iguala las historias de la Eva mitocondrial y el Adán del cromosoma Y. No dejaría de ser un caso más en el que a lo largo de la expansión de una especie que va a llegar al futuro, ocasionalmente se había hibridado con otras que se quedaron en el camino. Un caso conocido por lo mediático sería la hibridación cierta entre el *Homo neanderthalis*, el homínido de Denisova y el *Homo sapiens*, que comentamos en el capítulo 52 que titulamos como “Desde el primer homínido hasta el *Homo sapiens*”.

Las razas

Antes de cerrar este tema se necesita hacer un apunte sobre una de las consecuencias de la diseminación del hombre sobre la total geografía del planeta: la aparición de las razas. Los resultados de los estudios biogenéticos comentados en los párrafos anteriores parecen corroborar que el hombre moderno nació en África y lo hizo “una sola vez”. Luego las razas como manifestaciones diversas de su fenotipo han tenido que provenir de esta única semilla ancestral africana y no han sido el resultado de unas paralelas evoluciones “provinciales” independientes. De hecho, se constata que el genoma humano no varía significativamente entre razas, no más de lo que puede variar el genoma entre individuos en general. Y en esta bolsa del acervo genético del hombre, la que fija las *diferencias entre individuos*, sólo un 15% aproximadamente corresponde a *diferencias de raza* siendo el otro 85% atribuible a otras circunstancias. Y es más, este 15% de diferencias raciales afectan casi todas exclusivamente a la morfología externa, aquello que nos hace diferenciar a simple vista a individuos negroides de individuos mongoloides, por ejemplo.

Es por ello que las teorías más reconocidas sobre razas aseguran que las diferencias observadas son consecuencia, por un lado, de las adaptaciones a las condiciones ambientales de la región donde cada raza se desarrolló, y por otro lado como consecuencia de una selección sexual: las modas imperantes en un grupo humano pudieron decantar los rasgos de sus individuos hacia los que más se valoraban en aquella sociedad. Lo que descabalga cualquier idea de ventaja genética o de habilidades racionales entre razas.

En el entorno de esta última idea queda la realidad de que las razas que pudiéramos considerar más avanzadas, siguiendo la simple fotografía de la realidad actual, lo fueron porque estaban en el sitio oportuno y en el momento temporal oportuno ANTES de que las otras, que vinieron culturalmente por detrás, pudieran estarlo. Está demostrado que en aquellas zonas geográficas de nuestro planeta donde antes prosperaron los animales y las plantas domesticables, con más prontitud sus poblaciones tomaron el tren del desarrollo y del poder. Al resto no les quedó más remedio que ir a remolque. Recomiendo al respecto la lectura del libro “Armas, gérmenes y acero” de Jared Diamond.

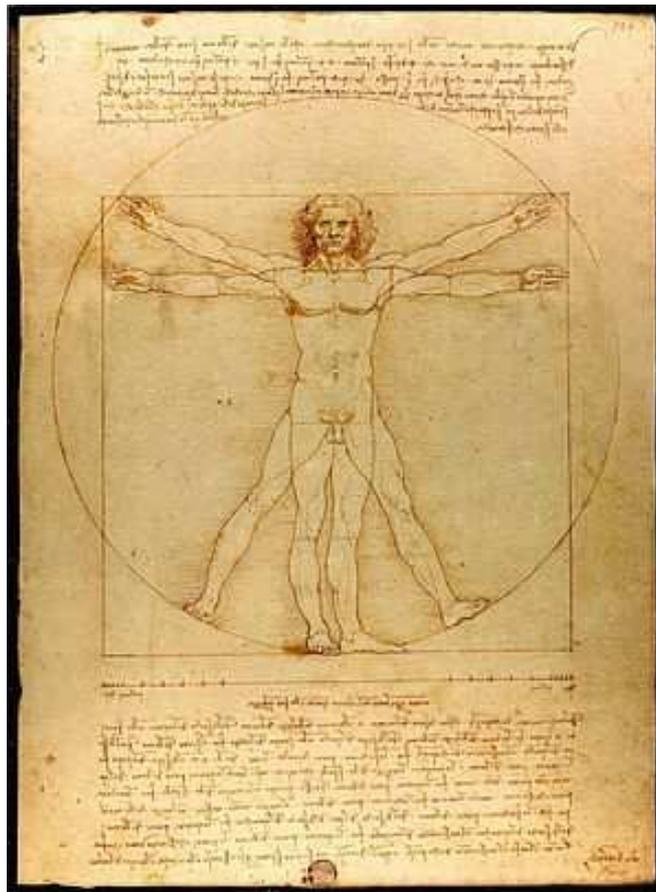
En este punto del relato, justo al comienzo del esplendor del *Homo*, podríamos decir que ya tenemos el trabajo acabado y que, por tanto, con esto queda clausurada esta larga mirada sobre la biografía de la Vida. Lejos quedan aquellos átomos danzarines acreciendo un disco planetario, aquellas moléculas simples y primitivas cooperando bajo la tutela de las fuerzas termodinámicas y físicas, el mundo del ARN, la célula con núcleo, los primeros organismos... un larguísimo camino hasta llegar al *Homo sapiens sapiens*.

Sin embargo, aún me quedan cosas por decir. Después de todo lo leído acerca de esta aventura de 4.500 millones de años, en mi cabeza no dejan de dar vueltas un sinfín de ideas relacionadas con el sentido de esta historia. Y aunque sé que muchos dirán ¡¿y a mí qué me importa lo que imagine este escritor?!, me voy a atrever a daros la lata con mis reflexiones. Me apartaré un poco del sustrato científico que he procurado seguir hasta ahora para situarme en el “*frontera*”. Pido disculpas desde hoy, pero me lo pide el cuerpo como último razonamiento personal a lo que me parece un infundado antropocentrismo. Esto será el objeto del siguiente capítulo.

56. Reflexiones

Queridos amigos lectores:

Estamos dando los últimos coletazos de esta historia sobre la biografía de la Vida. En el capítulo anterior me despedí de la historia evolutiva con la gran aventura de la colonización del planeta por los individuos de una especie que, hoy por hoy, parece poder manipularlo todo, incluso su medio ambiente, de una forma meditada y planificada: nos hemos puesto la matrícula de *Homo sapiens sapiens* ¿Doblemente sabio? Los humanos somos la repera.



Hombre de Vitrubio dibujado por el magistral Leonardo da Vinci, símbolo de la simetría básica del cuerpo humano y, por extensión, del universo en su conjunto (Wikimedia, dominio público)

Pero también amenazaba con emitir una serie de reflexiones personales. Y aquí están. No puedo apoyarlas con pruebas empíricas, por lo que se mueven rozando el perímetro de la casa de la Ciencia ¿Pensamientos más propios de la filosofía? Dejémoslos en simples reflexiones de un primate. Espero que los que hasta aquí habéis llegado y os encontráis leyendo estas líneas me perdonéis el atrevimiento. No veáis fundamentalismo de ningún tipo. Ni antifundamentalismos. Son simplemente temas acerca de lo que aconteció al hombre como sujeto racional, temas que me hacen pensar.

Dicho esto, el que quiera proseguir, que siga adelante. El que no, será igualmente bienvenido al final del paréntesis. Así que no me queda más remedio que abrirlo....

(

En el capítulo 54, que titulé “*El corazón de la evolución humana*“, hacía unos breves apuntes acerca del camino del *Homo* hacia lo “sapiens”: la emergencia de la autoconciencia reflexiva. Allí apuntaba también la novedosa incursión de aquellos hombres en el mundo metafísico, incursión que perdura hasta hoy, para muchos considerado como la expresión definitiva de lo que nos hace diferentes del resto de compañeros del planeta.

Pero, además, parece como si existiera un escalón cualitativo adicional, algo que añade una especie de destello luminoso al pequeño brote que representa la especie humana en el árbol filogenético: ¿qué podemos decir de las emociones?, ¿cómo aparecen el pensamiento ético y las normas de conducta morales?, ¿es capaz el cerebro racional de “inventar” estas emergencias metafísicas dentro de un normal proceso evolutivo? Tengo que confesar que no tengo respuestas, a pesar de que a lo largo de nuestra historia muchos hombres de pensamiento brillante han intentado buscar la solución. Incluso algunos aseguran haberla encontrado. Aunque, repito, no tengo respuesta concreta que ofrecer a mi razonamiento, no tengo duda en que debo ser fiel a y consciente de lo que contemplo, apoyado en el patrimonio del conocimiento científico.

Hace poco contemplé una fotografía que personalmente me impactó. Es la que sigue más abajo. Un grupo de chimpancés asiste desolado a la imagen que ocurre ante sus ojos. Es el último adiós a Dorothy, una de sus compañeras de grupo que acababa de morir. Sucedió en 2009 en el Centro de rescate para chimpancés Sanago-Yong.



(foto: Monica Szczupider, IDA-Africa, fair use)

La similitud con un duelo humano es tremenda. No pretendo que la foto anterior constituya una prueba científica sobre los posibles sentimientos de los animales y su grado de racionalidad. Quizás fuera la manifestación de una mera curiosidad. Aunque también muy bien pudiera ser la expresión de un sentimiento de empatía con Dorothy y el grupo, heredada de un ancestral antepasado, del que los humanos habríamos recibido también estas emociones y sentimientos de reciprocidad y solidaridad. Una pieza más del natural devenir evolutivo.

Porque personalmente me resulta difícil que la cadena “*percepción / emoción / reacción*”, “*veo el lobo / me asusto / echo a correr*”, se asimile a “*materia / espíritu / materia*” cuando realmente hay una explicación que no precisa romper la cadena de realidad química desde el principio al final. Si no fuera así ¿cuál es el soporte real que enlaza “*veo un niño enfermo*” con “*me emociono y debo cuidarlo*”? La frontera de lo material con lo inmaterial no existe y resulta imposible imaginar qué es lo que pueda rellenar y conectar a dos mundos que por definición son de imposible conexión por tratarse de entidades con dimensiones tan diferentes. Una que consideramos real y tangible; otra, abstracción del cerebro humano.

Sin entrar en demasiadas profundidades, lo que observamos nos lleva a la certeza de que sí hay una unión exclusivamente material: los afrodisíacos animan el sentimiento del amor, los tranquilizantes ayudan a soportar el

sentimiento de la depresión y tristeza, el alcohol da valentía a la timidez ¿Qué pasaría si no tuviéramos los sentidos que nos conectan con el exterior? ¿Tendríamos la percepción del Yo? La respuesta creo que debe ser “no”.

Pero no nos olvidemos de que la ciencia neurológica nos empieza a dar explicaciones. Las emociones son una sofisticación evolutiva (y yo diría que léxica humana) de los principios básicos de la homeostasis. El delicado equilibrio químico de lo vivo está pastoreado desde sus inicios por realidades contrapuestas que los hombres definimos como *agradable-desagradable*, *premio-castigo* o bien *dolor-placer*. En el fondo es lo mismo: huir del peligro, ser atraído por lo beneficioso. Y lo que en principio se conseguía en una bacteria mediante la acción de una simple molécula química, ahora se traduce en un complejo proceso químico que llamamos emociones. El cuerpo (particularizaríamos para el hombre) tiene sus “antenas” que monitorean tanto el exterior como el propio interior. Estas señales son recibidas en zonas específicas del cerebro (el tálamo y las cortezas sensoriales, entre otras) y tratadas en otras que las evalúan (la amígdala, la ínsula anterior y la corteza prefrontal ventral, las cuales están perfectamente interconectadas). A partir de la evaluación (que el pensamiento humano ha nominado como emociones: miedo, ira, tristeza o disgusto) se generan respuestas somáticas, ya sea mediante cambios químicos (hormonales por ejemplo), alteraciones del aspecto externo (sonrisa...) o disparando respuestas motoras (correr...), que son lo que sentimos. Y lo que es altamente significativo, estas respuestas son comunes para la práctica totalidad de los animales.

Eso nos dice la ciencia. Pero lo que nos dice también nos permite pensar que esta universalidad de las expresiones emocionales dibuja claramente un proceso automático. Y todo ello nos explica un origen basado en el proceso de selección natural.

Con el tiempo la cadena natural *emoción-respuesta somática* llegó también a los homos. Si recordamos a aquellos hábiles de hace más de dos millones de años y recordamos también lo que su conducta nos permitía inferir, no me resulta difícil pensar que en la cadena de los homo's que los sucedieron en algún momento surgió un **elemental código de conducta**, basado en la conveniencia del bienestar personal y de grupo como elemento de supervivencia. Simplemente eran un refinamiento evolutivo de los intereses de una homeostasis compleja en unos organismos complejos, dirigida una vez más por la ancestral dualidad *premio-castigo*, traducida somáticamente como *agradable-desagradable*.

A pesar de que la Arqueología Cognitiva nos indica que la autoconciencia aparece con posterioridad al *Homo habilis*, no me resulta difícil imaginar (aunque la imaginación sola no sea algo muy científico) que ya en estos primitivos homo's se iluminara una cierta inspiración, impulsada más por necesidades vitales que racionales: algo así como: "*La colaboración me va bien, si los otros colaboran me va bien, colaborar me hace encontrar mejor. Siempre que "pecho manchado" se comporta así resulta que las bayas se multiplican y hoy le ayudé a coger las suficientes para todo el grupo. Tengo que imitar su magia. Si hay un colega que tiene más, me viene bien el que me lo ceda en un momento de necesidad, pero no lo hará si yo racaneo a la contra. El otro día mi compañero me ayudó cuando vino la leona, sin él se habría llevado a mi cría*".

¿Cuál fue el momento en que surge el código de conducta? Nadie lo sabe y posiblemente nadie lo sabrá jamás. Como otras veces he dicho, la mente no fosiliza. Podemos seguir las pautas que sugieren las conductas de los homínidos, observables a partir de sus restos fósiles y arqueológicos: la arquitectura craneal, la tecnología usada y la evolución cultural entretejiéndose a lo largo de un proceso continuo, un *continuum*, como lo expresan los expertos en arqueología cognitiva.

En el camino se iba gestando la realidad de unos individuos con unas mentes autobiográficas, conscientes de la propia individualidad y de la del "otro", inmersos en un medio a la vez ajeno y propio, que podían manejar. El hombre racional y reflexivo.

La creciente cooperación social, el vivir un día a día de objetivos comunes, aunque fueran exclusivamente los vitales de aquí y ahora, tuvo que llevar necesariamente a los *Homo sapiens*, o quizás ya había llevado con anterioridad a los neandertales, a compartir unos nuevos valores -¿instintos racionales?, a este nivel ¿cuál es la diferencia?- comunes de supervivencia y bienestar. A los hombres modernos nos gusta llamar a estos valores *emociones sociales* -empatía, compasión, vergüenza, lástima, culpa, desdén, celos, envidia, orgullo, admiración-. En su conjunto configuraron una serie de normas de conducta ¿llamémosle moral? que entendían del bien y del mal, de lo que conviene o no conviene, siempre presente el patrón homeostático *placer-dolor*, dentro de un sistema social complejo, ¿cómo no pensar que con estos mimbres debió resultar inevitable el desarrollar un código universal de comportamiento de lo que está bien y lo que está mal, una base **ancestral de reglas éticas**? ¿Éticas? Sí, entendiendo lo ético como un sentimiento genérico que dirigía el comportamiento con un propósito vital: un existir más llevadero y feliz. O

copiando palabras del conocido neurólogo portugués Antonio Damasio: “*Las emociones sociales incorporan una serie de principios morales y forman una base natural para los sistemas éticos*”.

En resumen: todo me lleva a pensar que los humanos tan sólo somos unos organismos animales más, puro juego de la química y la evolución, y que nuestras emociones que nos impulsan y los valores éticos que nos orientan no son más que un simple momento puntual, uno más, del universo.

Y cierro paréntesis

)

El camino de esta extensa biografía de la Vida ha sido largo y azaroso, pero, al fin, podríamos pensar que la Tierra había parido a su hijo, que el propósito se había hecho realidad. Sin embargo, después de la lectura de todas las palabras, desde la primera de este escrito, de lo único que podemos estar seguros -¿podemos estar seguros de algo?- es que el *Homo* es un hijo más de la Tierra y nunca su elemento clave. La carrera de la evolución continúa y nuestra especie sigue estando sometida a ella; ¿cuál será el fin? Queda en manos del futuro.

De todas formas, las reglas del recorrido a partir de hoy no serán muy distintas a las del pasado. La presión medioambiental, con su complejidad y variabilidad, seguirá dibujando los meandros en el discurrir futuro de la Vida. Como ya lo hizo cuando *Lystrosaurus*, aquel reptil mamiferoide que concentró el éxito de la salida de la crisis del Pérmico/Triásico, claro vencedor del infierno, dominador de los espacios quemados. Poco le duró la alegría, ya que los dinosaurios le ganaron la mano y lo expulsaron a las cavernas subterráneas. Reptiles 1-Mamíferos 0. Los avatares del Universo también robaron este esplendoroso éxito de los dinosaurios ¡todos hubiéramos apostado por ellos! Pero una gran piedra de 10 kilómetros los degradó para siempre, condenándolos a la extinción, que no al olvido. Los ratoneros mamíferos aprovecharon de nuevo la crisis, que esta vez sí que parecía la definitiva. Organizó un camino de mejora -¿mejora?- hacia unos seres que prometían, que colonizaron todos los ambientes y todas las geografías. Seres realmente complejos, entre los que comenzaban a destacar los primates con sus habilidades. La fuerza del destino... ayudada por unos movimientos tectónicos y una climatología cambiante que hizo de los bosques tropicales un paraíso. Por poco tiempo, ya que fracturó a los de África y casi colapsó la continuidad de aquellas maravillas de animales: los primates que hace diez millones de años eran los “reyes del mambo”

fueron diezmados por el caminar lento y seguro de las fuerzas geológicas. De forma que sólo quedaron algunos pocos en los árboles, viviendo, que no compitiendo por la supremacía. Y hete aquí que de estas mismas causas de la catástrofe surgieron las bases para un nuevo empujón, de donde nació el *Homo, sapiens* para más señas.

Y a partir de ahora... ¿qué? Pues a partir de ahora, más de lo mismo. El caudaloso río de la Vida, lleno de meandros a derecha e izquierda, continúa lentamente con su fuerza arrolladora e imparable. ¿Cuál será el próximo cambio de rumbo en la “complejidad”? ¡Quién lo sabe!

Aunque hay quienes opinan lo contrario (un ejemplo lo podréis encontrar en esta⁽¹⁴⁶⁾ recomendable lectura del blog "*La Pizarra de Yuri*"), personalmente creo que un nuevo meandro, un inevitable cambio de rumbo se producirá, un nuevo meteorito, una nueva configuración de los continentes, un nuevo episodio magmático, un cambio cualitativo en la química atmosférica, un mal uso de nuestra inteligencia... inevitablemente algo sucederá que resultará letal para nuestra especie y que será una oportunidad para alguno de nuestros compañeros de viaje, **en todo caso insustancial para la marcha de la Vida**, para la marcha de la Tierra y para el discurrir de la intensa actividad del Universo.

¿Es el final?

Pudieran bien ser éstas las últimas palabras del relato de la “Biografía de la Vida”.

Pero con ellas no acaba mi afán escribano. Porque aún nos quedan incógnitas que interesan nuestra curiosidad: *¿Y después, qué?* ¿qué puede acontecerle a nuestra conocida Vida a lo largo del devenir del tiempo futuro? ¿hay vida fuera de nuestras fronteras?

Es difícil pensar con toda seguridad que la Vida se acabe con nosotros. Por ello me voy a permitir hacer una sucinta inmersión en estos temas a lo largo de cinco capítulos que sí serán los posteriores. Y entonces, sí, podré echar el telón.

57. Buscando vida desesperadamente

En el último capítulo dábamos por concluido el largo paseo durante el cual hemos permanecido atentos al devenir de nuestra compañera de viaje: la Vida. El caso es que le he tomado cariño y me cuesta el poner el cartel de fin de etapa. Porque nosotros nos quedamos, pero la Vida continúa. Entonces...

¿AHORA QUÉ?

Hemos conseguido llegar a lo largo de esta historia hasta el siglo XXI. Queda lejano aquel inicio de hace 4.570 millones de años cuando una incipiente estrella y varios planetesimales danzaban el vals que les imponían las leyes del Universo. El ambiente estaba enrarecido, la casualidad había congregado en un punto del espacio y en un momento del tiempo a ingentes nubes de gas y polvo que peleaban entre la atracción gravitatoria y la presión expansiva como consecuencia de la energía surgida en aquella gran compactación. En aquel momento constituyente... ¿quién hubiera imaginado el final de la representación?!

Y sin embargo, a pesar de la intensidad de los hechos durante los pocos miles de millones de años transcurridos en el intervalo, no deja de ser eso: un nimio detalle en la inmensidad de las dimensiones espaciales y temporales del Cosmos. Una pincelada con un largo pasado y un profundísimo futuro.

No puedo dejar de pensar que esta nube de gas y polvo de donde surgió *nuestro todo* estaba formada por viejos personajes, unos, como el hidrógeno y el helio -no mucho más- nacidos en los primeros segundos después de... digamos que el Big Bang. Y otros, generados en los infernales hornos nucleares de las infinitas estrellas que han sido y se fueron antes de nuestro Sol, alucinantes fuegos artificiales de supernovas. A disposición de todos. En cualquier parte del Universo.

Sí. El Big Bang es nuestra mejor explicación de la casa común que llamamos Cosmos. Momento constituyente en donde hoy por hoy científicamente pensamos que se ancla la frontera más lejana de nuestro conocimiento. ¿Qué fue lo que motivó el Big Bang? Misión imposible el

descifrarlo, ya que si imaginamos su inicio como un punto de infinita densidad y energía en un espacio infinitesimal, difícilmente sabremos qué hacer con él. No lo sabemos manejar, no somos capaces de conocer cómo fue el detalle de su instante inicial ni con las más sofisticadas herramientas y especulaciones matemáticas. La teoría cuántica nos abre una posibilidad, ya que ella nos explica la realidad de partículas virtuales, a escalas de lo que se supone es el elemento indivisible más pequeño del tejido espacio-tiempo. Partículas que salen de la energía del vacío formando parejas materia-antimateria y que desaparecen en tiempos infinitesimales como si nada hubiera ocurrido. No tenemos capacidad para observarlas, pero sí podemos intuir su paso al medir sus consecuencias. Una fluctuación cuántica de este estilo pudo ser la chispa inicial que impulsara una fría y desenfadada expansión inflacionaria del tejido espacio-temporal cuya colosal energía, al frenarse más tarde, creó un universo de materia y radiación en donde nos encontramos. Un Universo común, homogéneo e inmenso para la escala humana, en donde las leyes físicas son iguales en cualquiera de sus puntos. Un Universo que generaliza en toda su dimensión el mismo nivel de oportunidades experimentadas en la Tierra.

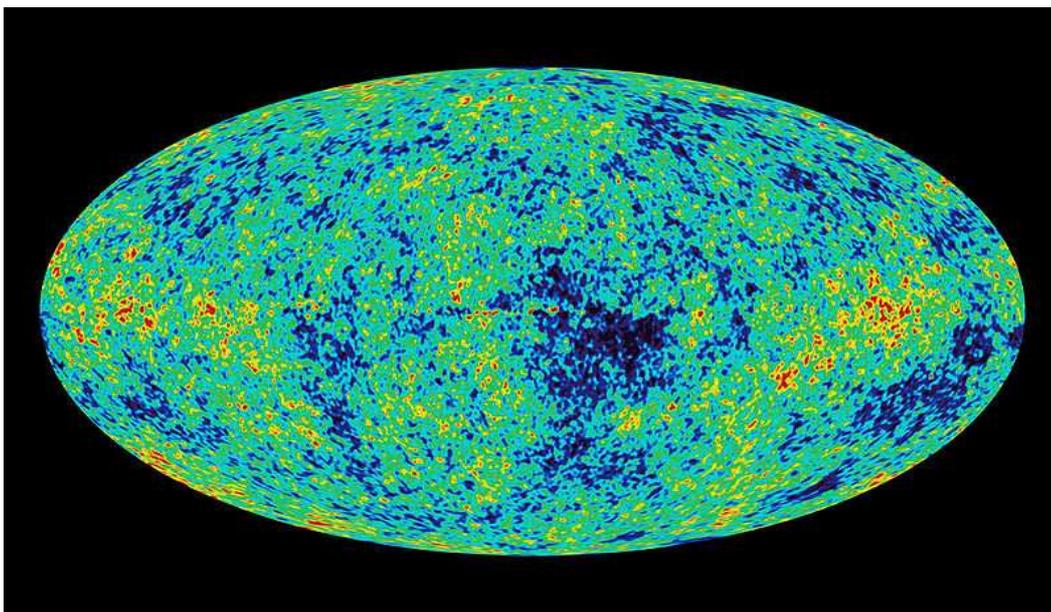
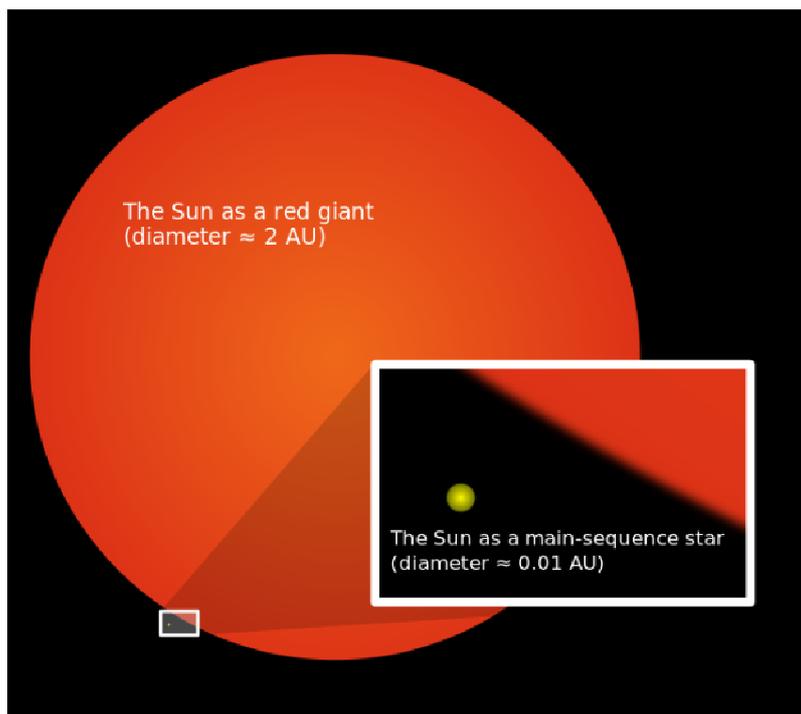


Foto de la casa de la Vida: imagen del universo y de su estructura reflejada en el mapa térmico de la radiación de fondo de microondas, tomado por la sonda WMAP (Wikipedia, NASA, dominio público)

No es éste el lugar para hacer digresiones sobre el tema, así que aquí lo dejamos, en el primer momento de la semilla que montó todo el escenario y sus actores. 13.720 millones de años atrás.

La historia contada en los 56 capítulos anteriores ocupa el último tercio de esta inmensidad. Y aún le queda cuerda al resorte que la mueve.

Pero descendamos de las alturas para recuperar nuestra más próxima parcela. El Sol es una estrella conocida, al igual que su previsible dinámica. Sabemos que irá quemando su combustible, ahora hidrógeno y helio, más tarde carbono, siguiendo una cadena de etapas cada vez más rápidas y violentas. Durante este proceso a partir de hoy, la Tierra seguirá con su progresivo alejamiento de su estrella a medida que el Sol vaya quemando su masa. La temperatura del horno se irá haciendo cada vez más elevada, lo que “inflará” las capas gaseosas más externas de la estrella. Se cree que la vida unicelular terrestre, semejante a la actual microbiana, aún podrá sobrevivir en latitudes y cotas altas hasta dentro de 2.800 millones de años, mil millones después de que las condiciones de temperatura en el resto de los lugares los hagan inhabitables. Los últimos rastros de vida que sobrevivan sobre la Tierra serán microbios extremófilos en ambientes cálidos y de alta salinidad, posiblemente en cuevas subterráneas. Después de esos momentos la Vida ya no será posible.



Comparación del tamaño del sol entre el momento actual y cuando sea una gigante roja, de aquí a unos 5.000 millones de años, con un tamaño de 2 AU. En la figura, AU significa “Unidad Astronómica”, que es la distancia a la que hoy en día se encuentra la Tierra del Sol. Por ejemplo, Marte está a 1,52 AU; Ceres, en el cinturón de asteroides, a unos 2,8 AU (Wikimedia, GNU FDL)

De aquí a 4.000 millones de años la Tierra habrá migrado hasta donde ahora orbita Marte, unas 1,6 veces más alejada de lo que se encuentra ahora del Sol. Pero no tendrá escapatoria: el volumen estelar de la estrella, progresivamente creciente, casi le habrá dado alcance. Y sí, será definitivamente el fin de la Vida tal como la conocemos sobre la Tierra. Mil millones de años después el Sol dará su último estertor, transformándose en una *estrella gigante roja* para ir progresivamente enfriándose y entonces, una vez que no haya fuego interno que empuje hacia fuera, la gravedad ganará definitivamente la partida menguando su tamaño hasta convertirse en una *enana blanca*. Sus átomos se apelmazarán tanto que no habrá espacio vacío entre los electrones, que al estar tan juntos comenzarán a darse codazos electromagnéticos usando la repulsión de sus cargas negativas. La fuerza de esta lucha contendrá la compresión gravitatoria: nuestra estrella se quedará con un tamaño semejante al de la Tierra. **FIN.**

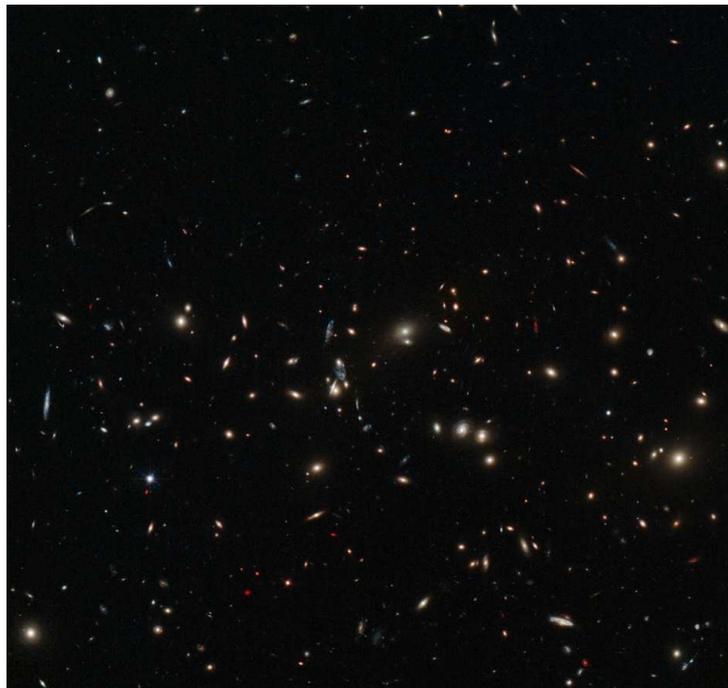
Pero no, no es el fin. Ni su nacimiento fue el principio, ni su periodo de vida la única existencia. Es difícil y fácil de imaginar: sabemos que si se repite un entorno semejante, es decir, un proceso de Big Bang idéntico en el que se dibujen las mismas asimetrías que han producido el mismo tipo de fuerzas y de materia que conocemos, y lo situamos cerca de una fuente de calor que energice las combinaciones químicas, en el sitio preciso para que el agua se mantenga líquida... es probable que se repita el proceso y que surja la Vida. ¿Basada en el carbono? Lo más plausible. Los mismos experimentos metabólicos con toda seguridad. ¿Las mismas formas? Seguramente no. ¿Al final la vida inteligente? Quizás sí o quizás no, ya que, como ya sabemos por lo leído en capítulos anteriores, nuestra capacidad de razonamiento reflexivo es fruto de unas ¿irrepetibles? circunstancias geológicas y climáticas. Ésta es la parte difícil de imaginar. Lo fácil surge al ver que nosotros estamos aquí y sin lugar a dudas constatamos que esta historia, independiente de cuán probable sea, es al fin y a la postre cierta.

En otro mundo semejante las circunstancias serían distintas, a pesar del determinismo de las leyes físicas y a pesar del indeterminismo calculado de nuestra más profunda esencia cuántica. Quizás las cianobacterias no sembrarían el mundo de oxígeno o quizás no habría un nuevo Chilxuluc que hiciera desaparecer a los dinosaurios. Pero la esencia de la Vida sí estaría presente.

Esto pudo pasar antes del nacimiento del sistema solar y puede pasar cuando no existan ni nuestras cenizas. Y lo que es más sorprendente: al

mismo tiempo que nuestro proceso constitutivo solar estaba en marcha, otros similares pueden estar escribiéndose ahora mismo... ¿por qué no? Somos insoportablemente antropocéntricos, vicio que nos impide ver con nuestros ojos. Nuestro entorno es vastísimo, común y lleno de oportunidades. Y la Vida, como resultado de un proceso de complejidad en los conocidos y pronosticables sistemas químicos, se empecina. Y medra donde menos nos lo podemos imaginar. Estoy hablando de organismos extremófilos, vecinos nuestros, en nuestro planeta.

Son una evidencia. Pero también podría hablar de cosas conceptual y físicamente imaginables, como la biología basada en el silicio en vez del carbono, o en otros planetas o en otras lunas de nuestro sistema. O quizás en otros sistemas solares de nuestra Vía Láctea o de lejanas galaxias. Sólo se tienen que dar las condiciones, ciertamente complejas, y el interruptor se accionará.



*Imagen del universo profundo tomada por el telescopio Hubble.
Corresponde al cúmulo de galaxias MACS J0152.5-2852 (Wikipedia:
ESA/NASA, CC Attribution 3.0 Unported)*

En nuestro Universo, al menos en la zona que se puede observar desde la azotea de nuestra casa con toda la sofisticada tecnología disponible, se cree que hay entre 50.000 y 125.000 millones de galaxias, cada una de ellas con cientos de miles de millones de estrellas. Unas estimaciones⁽¹⁴⁷⁾ realizadas en 2003 por el astrónomo australiano Simon P. Driver cifran el número de

estrellas observables desde la Tierra en 7×10^{22} . Los resultados se han obtenido a partir de la medición de la luminosidad de las galaxias en un sector del espacio mediante los más sensibles telescopios disponibles en su momento, para luego extrapolar el resultado al total del volumen del Universo observable. El número tiene que ser superior, y lo sabremos a medida que la tecnología nos amplíe la profundidad de la visión. De hecho, en 2010 se ha publicado un estudio⁽¹⁴⁸⁾ sobre las enanas rojas en el Universo que triplica las estimaciones anteriores.

Sean el número que sean, lo significativo es que, como veremos de aquí a dos capítulos, muchas de estas estrellas cuentan con unos cuantos planetas, algunos rocosos, y cada planeta con algunas o muchas lunas. El campo está servido y es extenso. Y más allá de nuestro horizonte de visión, a unos 46 mil millones de años luz, hay más... un infinito más.

Vamos a intentar profundizar.

Se han hecho esfuerzos para cuantificar las probabilidades de existencia de vida en otros lugares del Cosmos. Y la verdad es que creo que no hay que hacer mucho caso de los detalles... con la música es suficiente, y la música dice que puede que no suene descabellado. Aunque, como a todo lo que, dados los conocimientos y posibilidades actuales de la ciencia, no podemos aplicarle un completo proceso de falsabilidad... podemos al menos someterlo a cuarentena.

Simplemente por aportar cifras, comento la famosa ecuación de Drake, concebida por el radioastrónomo Frank Drake en 1961, con el objeto de cuantificar el número (**N**) de sociedades inteligentes extraterrestres de la Vía Láctea que están al alcance de nosotros. Lo hace a través de la siguiente fórmula, que parece alambicada pero que no deja de ser la “cuenta de la vieja” mediante un proceso de acumulación de posibilidades:

$$\mathbf{N} = \mathbf{R}^* \cdot \mathbf{F}_p \cdot \mathbf{n}_e \cdot \mathbf{F}_l \cdot \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{F}_c \cdot \mathbf{L}$$

Aclaro el significado de cada factor: **R*** es el número de estrellas formadas cada año en nuestra Vía Láctea. De ellas habrá una fracción **F_p** que contengan planetas, de los cuales serán rocosos, como la Tierra con su Vida, en un porcentaje **n_e**. En la nómina de estos planetas rocosos una fracción **F_l** desarrollan sistemas químicos autosuficientes que llamamos Vida. De ellos, con una proporción **F_i** emergen seres inteligentes, los cuales en una fracción **F_c** tendrán, en algún momento de su civilización, tecnología y voluntad para comunicar su existencia más allá de sus

fronteras planetarias durante los **L** años que dure tal civilización y tal voluntad.

Tras establecer su fórmula, Drake concluyó que habría hasta **diez** civilizaciones **en nuestra galaxia** que podrían contactar entre ellas. Hoy por hoy estamos en condiciones de incorporar a la nómina de estas civilizaciones, al menos, la nuestra. Quedamos a la espera de las 9 restantes.

Nos sentimos francamente optimistas si nos quedamos con el conjunto de los cuatro primeros factores, que son los que definen el *número de planetas en los que se habría desarrollado la vida*, casualmente llega al mismo número del final: diez. Pero la excitación no dura mucho ya que los siguientes dos factores de los siete -aquellos que cuantifican el *porcentaje de casos de vida inteligente, con tecnología adecuada para comunicarse y que quieran hacerlo*- introducen una gran restricción y dejan el cómputo global en una escasa milésima. Vuelve a subirnos la adrenalina al observar como al final de la propuesta “drakeniana” viene a salvarnos la **L**, que es *el tiempo en que estas civilizaciones están comunicativamente activas*: diez mil años. Y todo arreglado para Drake, un tipo muy serio pero también muy especulativo. Con toda la picardía posible, se me ocurre que también podemos especular con los poco más de cien años de nuestra “radio-civilización”, lo cual dejaría las anteriores cuentas de la Vía Láctea relativamente menguadas.

Ya sé que esta última frase es un golpe bajo para nuestras expectativas... aunque no tanto. Ya que las predicciones no se acaban con un especulativo factor **L**, el parámetro que hipotéticamente arregla la foto de familia de la Vía Láctea. Démonos cuenta de que ésta es una galaxia muy antigua, de tamaño intermedio y de unos 100.000 años luz de diámetro. Comparando⁽¹⁴⁹⁾ su tamaño con los 5,5 millones de la supergalaxia “IC1101” se queda en una minucia, pero resulta un monstruo para la pequeña “1 Zwicky 18” de tan sólo 5.000 años luz. Nuestra galaxia familiar casi podría clasificarse como una galaxia de tipo estándar, con sus 10 civilizaciones extrapolables como promedio al conjunto de nuestro universo. Intentemos hacer ahora un ejercicio mental a través del cual nos vamos a convertir en el más conservador de los astrónomos, ya que apostaremos por el más restrictivo valor que se nos ocurra para **L** = 1, a fin de cuentas estamos nosotros.

Y te animo ahora a aplicarlo al Universo total -al menos al observable con aproximadamente 10^{11} galaxias- añadiendo este nuevo factor a la primitiva

ecuación de Drake: **el salto cuantitativo en el valor ampliado de N es brutal**. De nuevo os confieso que me doy cuenta del grado de especulación que incorpora el triple salto mortal intelectual que estamos haciendo, el cual, evidentemente, puede ser inmenso. Pero también creo que la licencia no resulta definitivamente invalidante de la hipótesis de posibilidad de vida inteligente exterior. Es más, la dirección que marca parece bastante probable aunque hoy por hoy, a pesar de los serios esfuerzos aplicados, principalmente a través del proyecto SETI, aún no hemos logrado comunicar con nadie. Y quizás nunca lo consigamos.

Esto fue en 1961.

En 2002 los investigadores australianos Charles H. Lineweaver de la Universidad del Sur de Nueva Wales y Tamara M. Davis del Centro Australiano de Astrobiología han intentado cuantificar⁽¹⁵⁰⁾ en la medida de lo posible cuál puede ser la probabilidad de aparición de vida en un planeta semejante a la Tierra. Algo equivalente al factor F_1 de la ecuación de Drake. Se trata de un estudio matemático basado en la idea de qué pensaría un jugador de lotería que se sabe miembro de un grupo amplio de jugadores, a los que no conoce, pensando simplemente en cómo le ha ido a él. En si le ha sido fácil ganar un premio o no. Lo que le permitiría hacerse una idea de cuán probable es el ganar. El estudio de Lineweaver llega a la conclusión de que para un planeta semejante a la Tierra con una edad superior a los mil millones de años, la probabilidad de que en él se produzca un proceso de biogénesis es del 13% con un grado de confianza del 95%. No deja de ser un estudio teórico más, cuyo resultado no implica necesariamente que la Vida sea un elemento común en el universo. Pero también es un dato más en la misma dirección.

Y sin embargo... ¿dónde está? Quizás no existan seres tecnológicos por ahí afuera, lo que sería una pena, que no una decepción. Porque estamos discutiendo sobre la existencia de vida, cualquiera que sea su forma, incluso no necesariamente inteligente. Recordemos que 10 son el número de planetas que según Drake habrían desarrollado la vida en la vía Láctea. Que sepamos la hay en uno, nuestra Tierra. Un 1 seguido por once ceros si lo extendemos a todo el Universo observable. Y en esto estamos. Buscando.

En el siguiente capítulo ampliaremos el conocimiento sobre la vida real en condiciones extremas. Porque realmente ahí afuera hay una inmensidad que podríamos pensar imposible para la vida, aunque quizás no tanto.

58. Extremófilos

A lo largo de este nuevo capítulo avanzaremos un poco más en el proceso de investigación sobre la existencia de Vida fuera de nuestras fronteras planetarias. En el capítulo anterior hacíamos una serie de disquisiciones sobre la probabilidad de su ocurrencia partiendo de la conocida fórmula de Drake. En ésta analizaremos lo que pueden ser objetos de nuestra búsqueda apoyándonos en lo que conocemos: los seres extremófilos, esos seres casi invisibles que gustan de vivir en los sitios más insospechados.

Hoy, medio siglo más tarde de que Drake fijara su ecuación, la humanidad está embarcada en algo más profundo y estructurado. Quizás la tecnología más desarrollada haya ayudado al cambio de rumbo. Parece que abandonamos la idea de un contacto con seres pensantes y tecnológicos fuera de nuestra esfera, aunque ahí queda el proyecto SETI, y pasamos a hacer énfasis en las bases más elementales de la búsqueda, como si quisiéramos ir pasito a pasito a través de los primeros parámetros de la ecuación de Drake. Hoy en día el esfuerzo se centra en **buscar lugares adecuados** para la Vida, **aunque no sea inteligente**. Y el campo de juego es más que inmenso.



Extremófilos del tipo termófilo producen algunos de los vistosos colores de la fuente termal Grand Prismatic Spring, en el Yellowstone National Park (Wikimedia, dominio público)

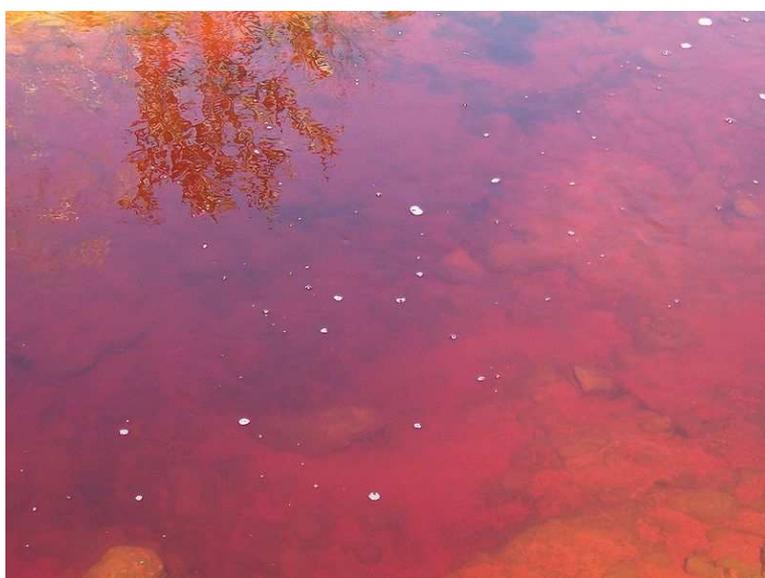
Creo que en este campo debemos discernir dos inmensas áreas de búsqueda: *la primera*, conocer al máximo la admirable versatilidad de la Vida que nos sorprende cada día con un nuevo organismo que vive en un entorno cada vez más imposible: el mundo de los **extremófilos**. *Lo segundo* es saber dónde pueden encontrarse estos lugares más allá de nuestro planeta. Inicialmente, dentro del Sistema Solar. Y como sabemos que sólo durará unos cinco mil millones de años, ampliar el campo de posibilidades más allá de nuestra familia, en el Universo que podemos observar, una gran esfera de ¡¡¡46 mil millones de años luz de radio!!! que se extiende hacia todos los puntos cardinales. Sobrepasada esta frontera incluso hay mucho más, lamentablemente algo que nunca alcanzaremos a ver en su totalidad desde la Tierra. La velocidad de la luz manda.

Es sorprendente dónde podemos encontrar bacterias. Ya sabemos que pudieron surgir, y aún las vemos allí hoy en día, en los mundos de altas temperaturas, a gran presión y con extraños pH de los venteos hidrotermales submarinos. Un extremófilo es un microorganismo que vive en condiciones extremas, entendiéndose por tales las que son muy diferentes a aquellas en donde viven la mayoría de las formas de vida en la Tierra. Suelen ser microorganismos tipo bacteria, aunque también hay eucariotas pluricelulares. Su pequeño tamaño y el hecho de que su metabolismo sea muy adaptable -sus enzimas funcionan de manera distinta a la del resto de organismos- ha permitido que colonicen ambientes que son mortales para la mayoría de los seres complejos.

Las hay que viven en ambientes sin agua, otras necesitan un medio extremadamente ácido o extremadamente alcalino para medrar. Ya hemos hablado de las que viven bajo las enormes presiones de los fondos marinos, llegando a once mil metros de profundidad. ¡¡Más de mil veces la presión a nivel del mar!! Las hay que precisan para vivir de una concentración salina que resultaría letal para el resto de vida. Y la sorpresa no deja de ser absoluta cuando hemos conocido que hay vida a tres kilómetros bajo la superficie terrestre, embebida en las microfisuras de las rocas, donde soporta temperaturas de sesenta grados centígrados y un pH básico de casi 10 (el normal para nosotros es 7, el del agua, y el máximo, 14). Dominan todo el espectro de temperaturas, desde los amantes del agua fría por debajo de los 5°C, creando sus propios anticongelantes, hasta las que son felices a más de 100°C y altas presiones. Aquellas para las que venenosos iones metálicos son como caramelos. Y qué decir de la tan temida radiación ionizante: en el área afectada por el accidente de Chernóbil muchos animales y plantas han mostrado, a pesar de los altos niveles de

radiación en la zona, una supervivencia y adaptación inesperada en muchos casos.

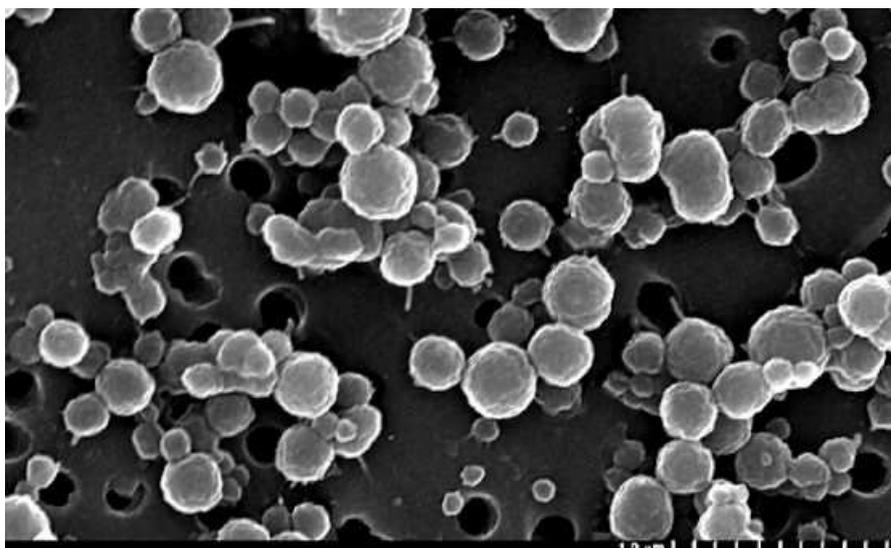
Es conocido el caso de los organismos acidófilos que pueblan las aguas del río Tinto, en España. Son extraños individuos de diversas familias de bacterias quimiolitótrofas y eucariotas, como algas y hongos, que sólo habitan en estas aguas del Tinto: extraen su alimento y energía de la pirita (FeS_2) y practicando la fotosíntesis en un mundo de un pH extremadamente ácido, entre 1,7 y 2,5. Algo parecido a vivir entre los ácidos gástricos de nuestro estómago. O en el planeta Marte. Tanto es así que diversos estudios⁽¹⁵¹⁾ realizados han confirmado la posibilidad de que algunos de estos organismos del río Tinto puedan sobrevivir bajo las restrictivas condiciones del mencionado planeta.



Las rojizas aguas del Río Tinto, color que deja el hierro de la pirita oxidado por las bacterias quimiolitótrofas. El ácido sulfúrico, segundo residuo de tan peculiar metabolismo, no se ve aunque casi podemos intuir el bajo pH (Wikimedia, dominio público)

En el Valle Victoria, situado al Este de la Antártida, se encuentra el lago Vida. Su superficie está permanente congelada y mantiene una capa de hielo de más de veinte metros que impide el paso de la luz solar. Totalmente oscuro, sus aguas poseen una salinidad seis veces mayor que la del mar y se encuentran a una temperatura media de $-13,5$ ° C. Esta alta salinidad hace que parte de sus aguas permanezcan en estado líquido, pero, al constituir un entorno cerrado al mundo exterior, no contienen oxígeno. Aunque sí pueden presumir de tener el record de los mayores niveles de óxido nitroso de cualquier agua natural en la Tierra, resultado de las

reacciones químicas entre la salmuera y los sedimentos ricos en hierro que hay bajo el agua helada. Este compuesto químico, el óxido nitroso, provoca alucinaciones en los hombres, generando un estado eufórico y en algunos casos ocasionando la pérdida de parte de la memoria. Diríamos cualquier cosa del lago Vida menos que es un sitio apetecible para la vida. Antagónico juego de palabras que, por contra, se ha demostrado falso, ya que en este ambiente viven “felices” diversas y abundantes comunidades bacterianas, sin la asistencia de los energéticos fotones de la luz solar y allí “encarceladas” desde hace más de tres mil años. Poco menos que sorprendente, pero real.

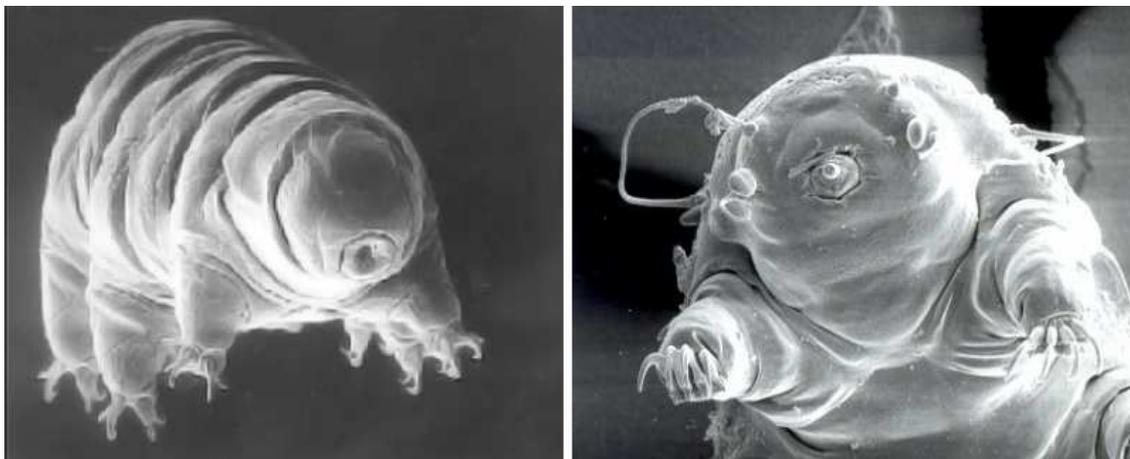


Bacterias del lago Vida, en la Antártida (NASA, dominio público)

Otro curioso caso, el de los tardígrados -“*los de lento caminar*”-. Me parecen un ejemplo asombroso de la versatilidad de la Vida. Ya no hablamos de bacterias que, a lo mejor por el desconocimiento que tenemos de ellas, parece como si su pequeñez fuera la tarjeta mágica para cambiar con facilidad su metabolismo y poder pasearse por los mil escenarios diversos en donde les toca vivir. Un tardígrado es un organismo del dominio eucariota pluricelular y además de aspecto muy amable. Son muy pequeños, alrededor de un milímetro de longitud, con ocho patas y un moverse parecido al de los osos, por lo que también se les llama “*ositos de agua*”, y aunque a la vista de su imagen nadie lo diría, están emparentados con los artrópodos.

La habilidad más impresionante de los tardígrados es su capacidad de entrar en una especie de estado de hibernación cuando las cartas le vienen mal dadas. Inducen su deshidratación, de forma que pasan de tener un 85% de agua corporal, como es habitual en este animal, a quedarse con tan sólo

un 3%. En este estado el crecimiento, la reproducción y el metabolismo se reducen o cesan temporalmente, y así pueden pasar⁽¹⁵²⁾ más de 10 años en un estado de anhidrobiosis.



Imágenes de Tardígrado (obtenidas del blog marulo.com, CC BY-NC 3.0)

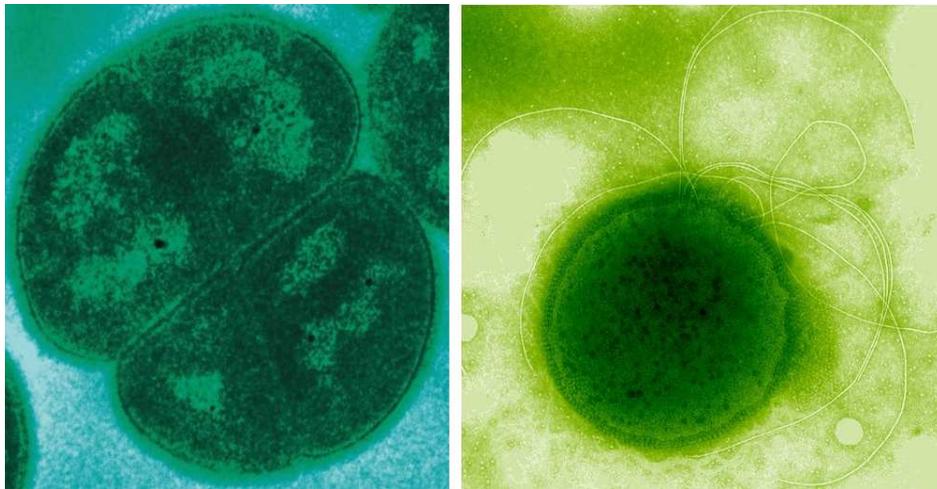
No es de extrañar por tanto que sobrevivan a complicadas situaciones de frío o calor -pueden aguantar temperaturas que oscilan entre menos 272°C, casi el cero absoluto, y más 149°C-. La sequedad extrema, la radiación ionizante y la polución no son problema para ellos. Un baño en alcohol puro o éter puede serles tan poco peligroso como caminar bajo el agua. Científicos rusos afirman haber encontrado tardígrados vivos en la cubierta de los cohetes recién llegados de vuelta del espacio exterior. En fin, unos campeones de lo inimaginable. Quizás parte de su éxito radica en que practican⁽¹⁵³⁾ la transferencia horizontal de genes con otras especies ¡hasta una sexta parte de su ADN lo han conseguido así!

Estas habilidades también las poseen seres más complejos, como por ejemplo el crustáceo branquiópodo *Artemia salina*. Vive en charcas de aguas saladas, como podéis imaginar soportando una alta concentración de sales en su exterior y episodios de escasez de agua. Cuando se llega a la desecación total la *Artemia* desova unos huevos, quistes, altamente resistentes. En estas extremas circunstancias los quistes pueden sobrevivir durante una hora a temperaturas superiores a los 100 °C y en el otro extremo de la horquilla pueden ser expuestos casi al cero absoluto de forma indefinida. Son capaces de resistir estando en el interior de cristales de sal común. Y, como los tardígrados, soportan las altas radiaciones, la inmersión en líquidos mefistofélicos como el alcohol y la acetona y la total ausencia de oxígeno⁽¹⁵⁴⁾.



Imagen de Artemia salina (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Como no podíamos esperar otra cosa, el huevo de la *Artemia* tiene una capacidad asombrosa de resurrección. Una vez se encuentra de nuevo en un ambiente húmedo, en un periodo de 24 a 48 horas el quiste vuelve a hidratarse y continuar su existencia como larva viva.



A la izquierda la bacteria Deinococcus radiodurans y a la derecha la archaea Thermococcus gammatolerans (Wikimedia, dominio público y CC BY-SA 3.0 Unported)

Terminamos esta breve relación de extremófilos hablando de la bacteria *Deinococcus radiodurans*. Supongo que imaginaréis tras la lectura de su nombre en qué es campeona. Sí, soporta bien, pero que muy bien, la radiación. Como le sucede también a la archaea *Thermococcus*

gammatolerans, ¡buen nombre también! Entre otras habilidades extremófilas (deseccación, temperaturas extremas, vacío...) diversos estudios ⁽¹⁵⁵⁾⁽¹⁵⁶⁾⁽¹⁵⁷⁾ llevan a la conclusión de que pueden recibir dosis de radiaciones ionizantes cuatro órdenes de magnitud superiores a las que son letales para los humanos. Estaríamos hablando de unos 15.000 a 30.000 grays. El gray es la unidad de la dosis de radiación ionizante absorbida y podemos considerar, más o menos, que recibir 10 es mortal de necesidad para un humano.

Y qué decir de ciertos organismos endolíticos que viven en suelos profundos, ocupando microporos entre los granos minerales de las rocas soportando altas presiones y temperaturas. Es el caso de la bacteria anaeróbica *Bacillus infernus* -¡otra vez un buen nombre!- encontrada a casi 3.000 metros de profundidad, o de la también bacteria *Desulforudis audaxviator*, la “audaz viajera” de los 2.800 metros bajo el nivel del suelo.



Criptoendolitos embebidos en una roca del continente Antártico. Lo más sorprendente es que se trata de líquenes necesitados de la luz (Wikimedia, GNU FDL 1.2)

Como podéis imaginar podríamos traer a nuestro relato infinidad de casos de este tipo de organismos extremófilos que nos parecen increíbles. Continuamente se descubren nuevos y en entornos más extremos. Y precisamente estos ejemplos son los que nos llevan a pensar que la Vida es posible en muchos más lugares que los que un hombre puede concebir como habitables. Y estos lugares no tienen por qué estar en la Tierra.

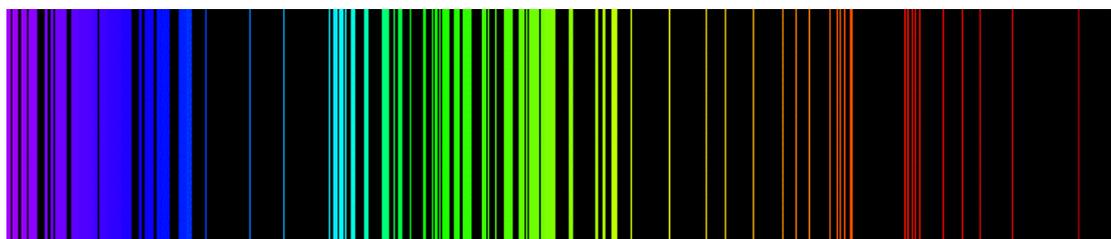
En el siguiente capítulo analizaremos cómo nos las estamos ingeniando para encontrar este tipo de vida más allá de nuestras fronteras planetarias. Hay que reconocer que estamos muy en mantillas e iniciando la ruta, aunque en los últimos pocos años los avances en la definición de posibles

escenarios han sido muy importantes. No digo que completamente esperanzadores, pero al menos estamos haciendo camino.

59. ¿Tenemos vecinos?

En el capítulo anterior habíamos iniciado la búsqueda de vida fuera de nuestro planeta intentando conocer cómo podía ser el objeto de nuestros deseos. Fuera de la Tierra las condiciones, en su mayoría, pueden ser muy inhóspitas, por lo que dirigimos nuestros ojos hacia aquellos seres que conviven con nosotros en ambientes muy, pero que muy, difíciles: los extremófilos. Con esto no quiero decir que realmente vayamos a encontrar el tipo de seres duros de la Tierra. Lo más probable es encontrar seres parecidos. Aquí vamos a dedicarnos a ver el campo de búsqueda, lugares en el sistema solar en donde puede ser posible la vida.

Está claro que no disponemos de una tecnología desarrollada como para poder llevar a cabo una observación directa de estos hipotéticos extremófilos. Por lo que nos deberemos concentrar en la búsqueda de las pistas colaterales que nos llegan con la luz que recibimos del exterior. En su espectro viene la información necesaria. Analizando la distribución de sus bandas podemos saber qué tipo de átomos las emitieron o se interpusieron en su camino. La explicación es muy sencilla. Cada átomo - elemento químico- tiene una configuración particular de sus capas electrónicas. Cada una a un nivel de energía determinada y específica del elemento. Si uno de sus electrones se muda de una a otra es porque ha recibido o ha emitido un fotón, cuya energía -frecuencia- captamos y podemos ver reflejada en su espectro.

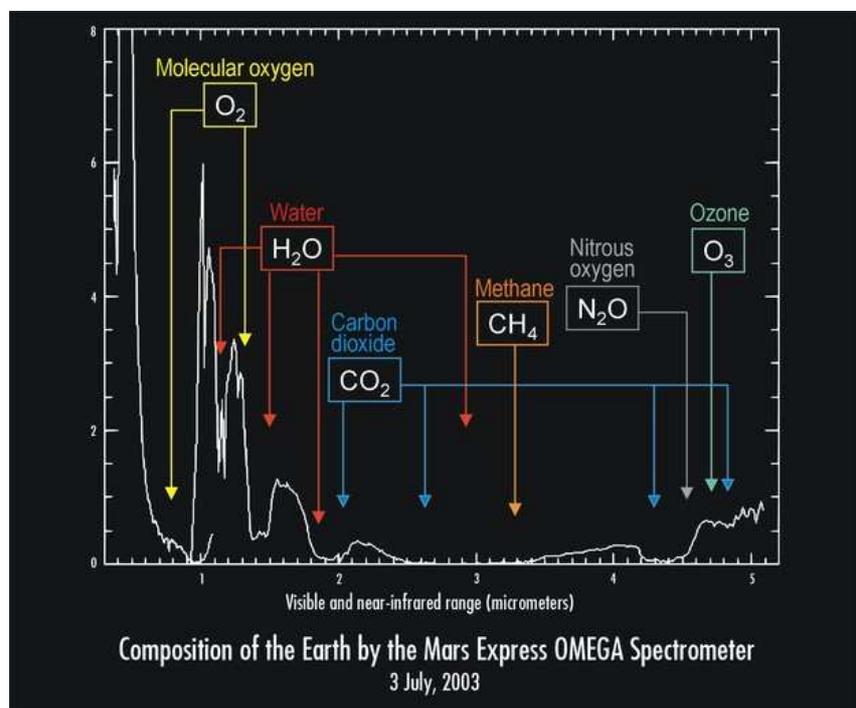


Espectro de frecuencias de un rayo de luz. En este caso se trata de la emitida por átomos de hierro en el intervalo visible electromagnético (Wikimedia, dominio público)

¿Por qué es importante saber que átomos hay ahí? Porque la actividad biológica deja pistas químicas en sus subproductos, lo que se conoce como

biomarcadores, moléculas resultantes de la actividad metabólica de los organismos vivos. Si queremos saber si en un exoplaneta o en una exoluna hay algo semejante a lo que hay en la Tierra, lo lógico es intentar seguir la pista a estos biomarcadores. Puede haber de muchos tipos en la atmósfera de un planeta habitable, pero la mayoría resultan invisibles si los observamos a varios años luz de distancia. Por este motivo nos tenemos que centrar sobre aquellos elementos que son realmente los mejores indicios de vida: **oxígeno**, **ozono** y **metano**. Además, podemos buscar la presencia de **dióxido de carbono** como producto secundario de la respiración y de **agua** como disolvente universal necesario para que la vida sea una realidad. Aunque no son biomarcadores, ambos juegan un papel fundamental en la biosfera terrestre.

Ya sabemos que el *oxígeno* en la Tierra ha sido en su mayoría consecuencia de la actividad biológica de las cianobacterias y de los seguidores de su invento, la fotosíntesis. Sin embargo, eso fue en la Tierra ¿Podría ser que en otros lugares la Vida no hubiera seguido exactamente el camino que tomó en nuestro planeta? Bien podría existir un planeta repleto de organismos que no utilizan el oxígeno en su metabolismo, como pasó en los inicios de nuestro planeta, cuando todo proceso biológico era anaeróbico. Lo cual nos llevaría a una atmósfera en la que este gas no estuviera significativamente presente aunque hubiera vida.



Biomarcadores en el espectro de la atmósfera de la Tierra visto por la Mars Express (Imagen: ESA, fair use)

Pero también tenemos que pensar que aunque haya una fuerte correlación entre la existencia de oxígeno y la de la vida, también se puede producir por procesos abióticos: el oxígeno no sólo es un subproducto del metabolismo orgánico, sino que también lo es de la fotodisociación de la molécula de agua por acción de los rayos ultravioletas, tanto en la atmósfera como en las superficies de masas de agua o hielo. Así que bien pudiera ser que el oxígeno que detectemos en un exoplaneta no tenga nada que ver con organismos vivos. Como vemos, lo relacionado con este elemento puede ser un tremendo lío.

El *ozono* es más fácil de detectar que el oxígeno y en su mayoría proviene de la asociación de tres átomos de oxígeno por acción de las radiaciones ultravioleta: señala la existencia de oxígeno y además favorece el desarrollo de la Vida en cuanto a que es un protector frente a estas radiaciones ultravioleta. Por desgracia, también puede formarse mediante mecanismos abióticos, aunque en estos casos se produce en concentraciones muy bajas.

Aunque en la Tierra el *metano* primigenio apareció en los arrastres de las erupciones volcánicas, podemos decir que en casi su totalidad se generó y se genera como resultado de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. Al igual que el oxígeno, es un gas inestable que necesita ser repuesto continuamente, por lo que su presencia mantenida sólo puede explicarse por la existencia de las dos causas que hemos mencionado, biológicas o geológicas. La detección simultánea de oxígeno y metano en una exoplaneta sería un indicio a favor de la presencia de formas de Vida.

Ahora que sabemos lo que conviene buscar, hagámoslo para empezar en las cercanías. Puede que haya vida, o la haya habido, en nuestro sistema solar: Marte, los satélite saturninos Titán y Encélado, el joviano Europa, o incluso el más alejado Tritón, satélite de Neptuno... Andamos tras la pista del agua, la madre de la Vida, aunque después de lo dicho en el capítulo anterior, cuando hablamos de los organismos extremófilos, eso casi puede parecer irrelevante.

En la actualidad es bien conocido que **Marte** es un planeta “seco”. Tan solo se ha podido encontrar agua en estado sólido -en los casquetes polares constituidos por grandes masas de hielos perpetuos o en paredes de cráteres o valles profundos donde no incide nunca la luz solar- y se especula que en el subsuelo puedan darse las condiciones ambientales para

que el agua se mantenga en estado líquido. Se han detectado grandes glaciares enterrados con extensiones de decenas de kilómetros y profundidades del orden de un kilómetro. Es evidente que hace millones de años por su superficie corría el agua líquida y que está claro que el hemisferio norte del planeta fue un gran océano. Eran otras las condiciones de su atmósfera y la presión que ejercía sobre la superficie.



El volcán marciano Ceratoni Tholus. A su lado el más pequeño Uranus Tholus (Wikimedia, NASA, dominio público)

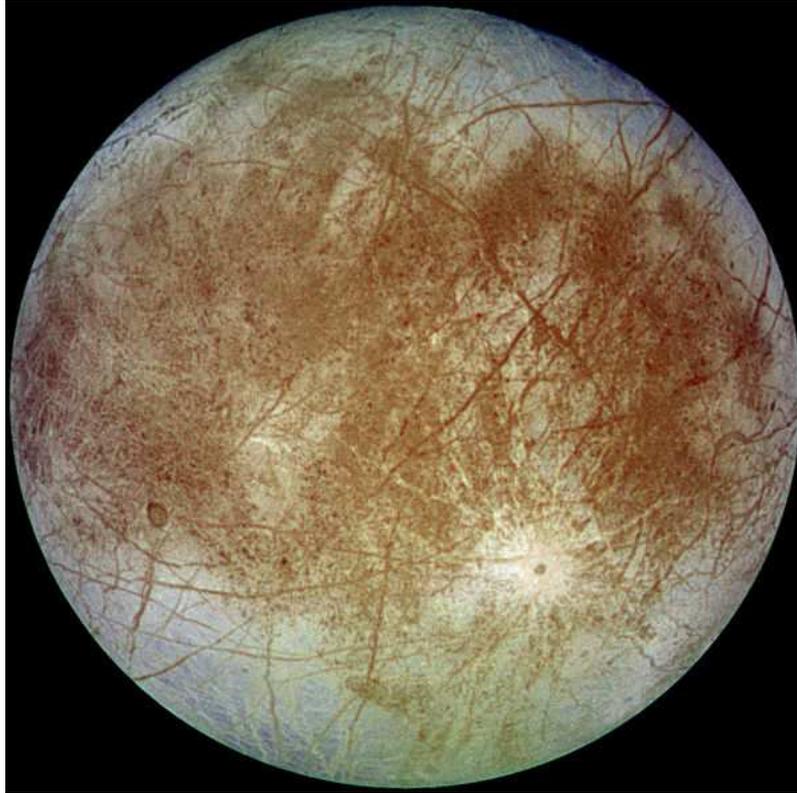
La existencia de agua en Marte se ha podido corroborar gracias a la infinidad de fotografías de gran calidad obtenidas por las sofisticadas naves de la NASA y la ESA. En la imagen anterior, por ejemplo, podemos ver al volcán marciano Ceratoni Tholus. Tiene 130 kilómetros de diámetro y su cima se eleva a 5,5 kilómetros sobre las llanuras adyacentes. Se observan claramente las antiguas torrenteras que peinan sus laderas e incluso lo que parece un cráter convertido en cuenca endorreica. Hablando de escorrentías es preciso comentar lo que parece ser la huella de flujos, estacionalmente activos, de disoluciones de sal muera que han sido anunciados⁽¹⁵⁸⁾ en septiembre de 2015 por la NASA. El hecho de que sean de sal muera es significativo ya que eso es lo que permite al agua mantenerse en estado líquido en el ambiente de baja presión y temperatura de la superficie de Marte.

Hay por tanto muchas y muy claras evidencias de agua en Marte, como hemos podido comprobar⁽¹⁵⁹⁾ recientemente gracias a la sonda MRO de la

NASA, y en donde hubo agua pudo haber Vida. Se especula también con las trazas de gas metano que fueron detectadas⁽¹⁶⁰⁾ en la atmósfera de Marte en 2003, lo cual es considerado un misterio, ya que, bajo las condiciones atmosféricas del planeta y la radiación solar, el metano es inestable y tiende a desaparecer con el paso de los años, lo que permitiría hacer la hipótesis de que en Marte debe existir una fuente productora de metano que mantiene su concentración en la atmósfera y que produce un mínimo de 150 toneladas cada año... ¿se trata de bacterias metanógenas? Un año más tarde también la nave Mars Express de la ESA confirmó⁽¹⁶¹⁾ la existencia del metano atmosférico marciano (concentraciones de 10 ppb). Sin embargo los datos⁽¹⁶²⁾ obtenidos por el rover Curiosity de la NASA que está analizando en directo la superficie marciana sólo ha logrado confirmar una presencia residual de este gas, una sexta parte de los datos anteriores, lo que nos aleja la posibilidad de que represente la existencia de biometanógenos. La controversia sigue servida.

Unos pocos kilómetros más allá, tan sólo 550 millones, orbita el gran Júpiter gaseoso, con su cohorte de satélites. Nos fijaremos en **Europa**, que tanto sorprendió a Galileo cuando enfocó por primera vez su telescopio hacia esta luna. Lo hizo el 7 de enero de 1610 y fue una demostración contundente de que no todos los astros giraban alrededor de la Tierra: por lo menos cuatro circunvalaban Júpiter. Europa es semejante en tamaño a nuestra Luna. Pero sus composiciones distan mucho de ser parecidas. La superficie de Europa es un casquete helado, de agua. A gran escala es una suave bola blanca, sorprendentemente lisa, sin apenas cráteres, lo que indica que su superficie se recicla con rapidez. Pero realmente está cruzada por infinitud de grietas. Más o menos anchas, con una configuración de bandas de colores que hace pensar en que estas grietas se abren de vez en cuando emergiendo por su parte central nuevo material: más agua que se hiela en las condiciones de temperatura de la superficie.

Algo así como las dorsales oceánicas de la Tierra en versión H₂O. El tamaño de Júpiter induce unas tremendas mareas gravitacionales sobre la masa de Europa. Y así como en la localidad costera francesa de Mont Saint-Michel el mar se eleva hasta unos catorce metros por acción de la fuerza gravitatoria del Sol y la Luna, la superficie del planeta jupiterino lo hace unos 30 metros ;¡teniendo un radio tres veces menor que la Tierra!! Podemos imaginar la exorbitante energía de deformación liberada cada tres días y medio, que es lo que dura su periodo orbital. Todo indica que sobre el núcleo de hierro y sílice se encuentra un gran océano subterráneo de agua líquida de 100 kilómetros de espesor.

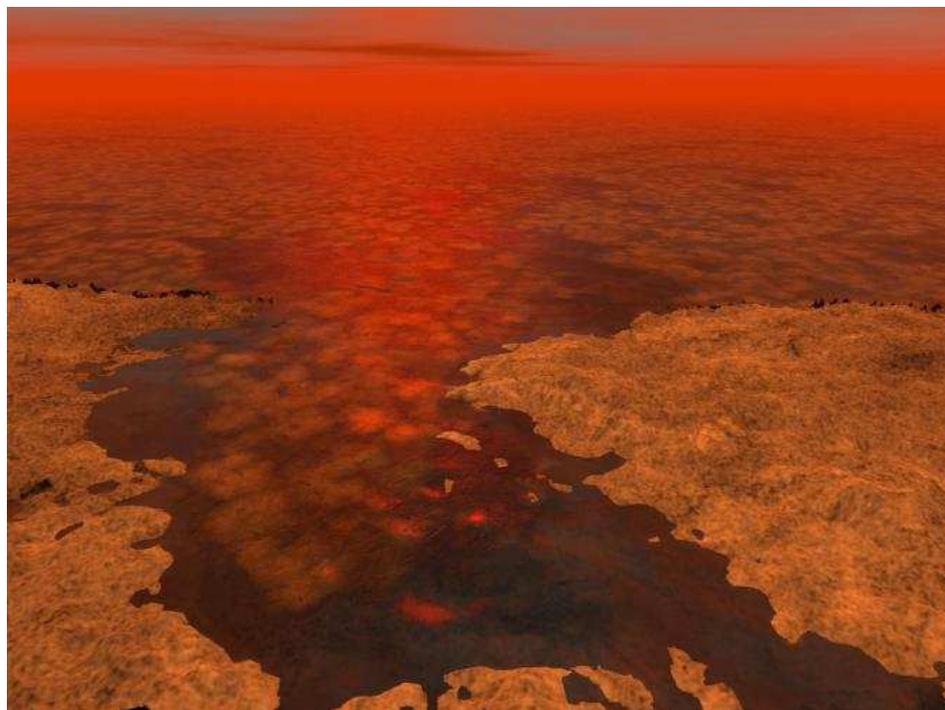


*Imagen de la superficie de agua helada de Europa, luna de Júpiter
(Wikimedia, NASA, dominio público)*

Y toda esta digresión para llegar al agua líquida una vez más. El profesor Richard Greenberg de la Universidad de Arizona ha estimado⁽¹⁶³⁾ que Europa la tiene en suficiente cantidad y con una elevada concentración de oxígeno, incluso mayor que en nuestros mares. Concentraciones semejantes serían suficientes para mantener no sólo microorganismos, sino también formas de vida más complejas. No parece un mundo raro para un extremófilo.

Titán es un caso extraño. Desconocido hasta que lo descubrió el astrónomo Christiaan Huygens en 1656, es el mayor de los satélites de Saturno, con un tamaño casi el doble del de la Luna. La rareza estriba en que su atmósfera es densa, es la única luna del sistema solar que la posee. Un 94% de nitrógeno y el resto hidrocarburos entre los que reina el metano. Las condiciones de frío y temperatura a tanta distancia del Sol, 1.400 millones de kilómetros, hace que el metano pueda permanecer normalmente en estado líquido. Allí realiza la función que el agua realiza en la Tierra: tiene su ciclo de evaporación, lluvia, escorrentías con degradación del suelo y almacenamiento en mares y lagos, con unas riberas heladas.

Su superficie de hielo está muy fragmentada y erosionada con volcanes de impacto, pero también otros que se creen que emiten hielo y amoníaco. En algunas zonas el hielo de la superficie parece estar recubierto de materia orgánica.



No es una foto sepia de un amanecer en las islas noruegas de Spitsbergen, es Titán en persona (Imagen: NASA/JPL-Caltech/USGS, fair use)

Este satélite posee también una densidad que hace presuponer que su masa está en gran medida constituida por hielo de agua. A la vista de ello se supone también que en sus profundidades puede encontrarse un mar de agua líquida y amoníaco sobre un fondo de roca. El escenario hace volar la imaginación a los astrobiólogos. Titán, con una superficie exterior repleta de compuestos de carbono, algunos de ellos en el camino de los materiales orgánicos para la vida, un mar de agua interior sobre un fondo rocoso en donde se pudiera repetir condiciones semejantes a las fumarolas submarinas terrestres. ¿Por qué no pensar en la vida?

Esta idea de vida en la saturnina luna Titán se ve reforzada después de que en 2014 se haya reportado⁽¹⁶⁴⁾ la existencia de microorganismos viviendo en los lagos de asfalto -un líquido viscoso compuesto de hidrocarburos- de la isla de Trinidad, en el Caribe.

Tenemos datos curiosos de esta luna obtenidos mediante la sonda Cassini, que la sobrevoló durante 2004, y de la sonda Huygens que aterrizó sobre su

helada superficie en 2005. Se esperaba encontrar en las mediciones de su atmósfera un cierto porcentaje de hidrógeno, resultado de la disociación del acetileno y del metano provocada por los rayos ultravioleta en la atmósfera más exterior. Pero ni las concentraciones medidas de acetileno ni las del hidrógeno se correspondían a lo que debía ser un proceso químico independiente en un medio inerte, ni su difusión por la atmósfera se hacía de manera uniforme. Sorprendentemente, el H_2 disminuía a medida que se acerca a la superficie de Titán, como si allí se diera un proceso químico que lo consumiera. No obstante, el desequilibrio de estos elementos se podría explicar mediante algún proceso inorgánico todavía desconocido que provocara la fijación del hidrógeno en la superficie y retirara el acetileno de forma selectiva. Pero los datos son también compatibles con la presencia en Titán de algún tipo de organismo vivo que viviera en el metano líquido, se alimentara de acetileno y consumiera hidrógeno atmosférico: equivalente al agua, dióxido de carbono y oxígeno del esquema terrestre. De nuevo vuela la imaginación.

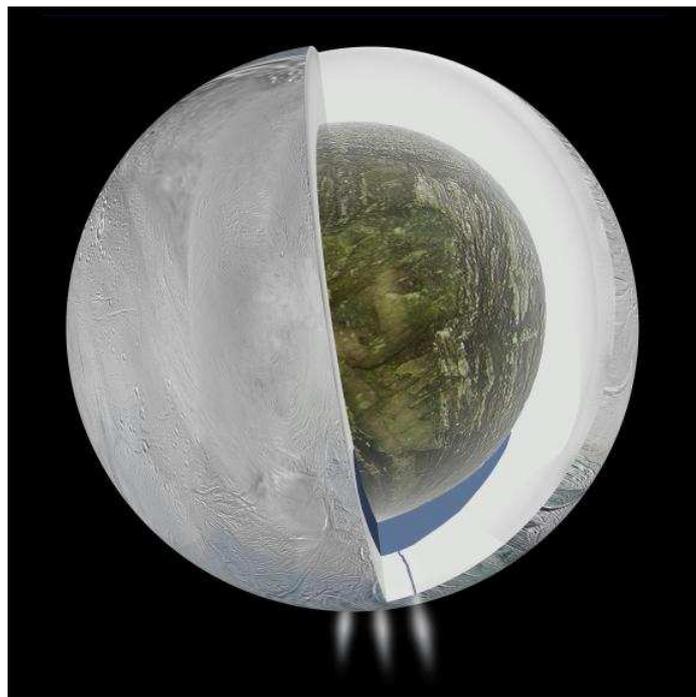


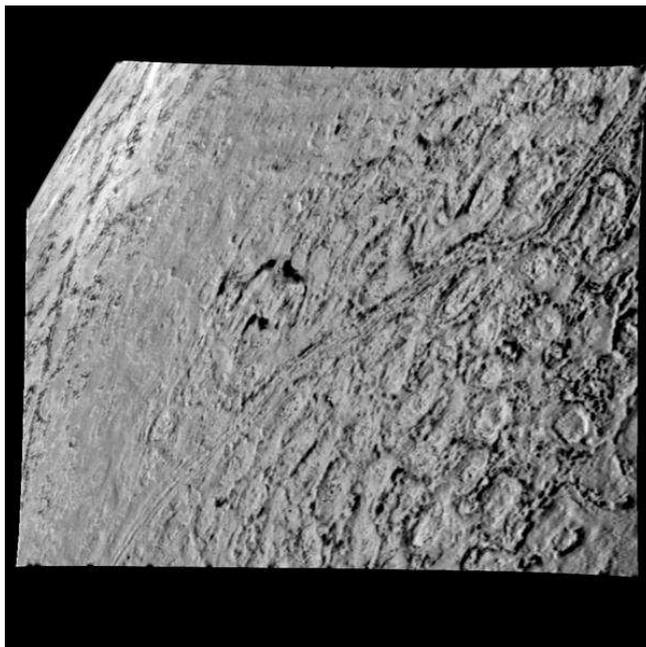
Diagrama que ilustra la constitución interna de Encélado con un núcleo rocoso y su mar interior de donde proceden los géiseres de hielo situados en el polo sur (Imagen: NASA/JPL-Caltech/USGS, fair use)

En la nómina de posibilidades se encuentra también **Encélado**, luna compañera de Titán. Al igual que en éste, el análisis⁽¹⁶⁵⁾ de su gravedad parece sugerir que posee un núcleo central poco rocoso y una capa externa de hielo. Y entre ambos, en posiciones próximas al polo sur, un

mar subterráneo proyectando géiseres de hielo por las grietas. Gracias a los datos aportados por la sonda Casini acerca de los materiales eyectados en estas emisiones, se cree⁽¹⁶⁶⁾ que en el fondo del mar subterráneo podría estar produciéndose una actividad hidrotermal. Ya sabemos del capítulo 5, “*La casa natal de la Vida*“, la importancia de este tipo de procesos en la generación de vida en la Tierra. Completamos la imagen de Encélado diciendo que su atmósfera está compuesta prácticamente por agua.

Nos tenemos que ir ahora a 4.500 millones de kilómetros de la Tierra para encontrar a otro posible candidato a transportista sideral de vida: el satélite de Neptuno **Tritón**. La atmósfera es semejante a la de Titán, mucho nitrógeno aderezado con metano. Presenta una gran actividad geológica del tipo de criovulcanismo de nitrógeno líquido provocado por un diferente calentamiento zonal por parte del sol. Esta circunstancia, a pesar de que la temperatura en su superficie es congeladora, -235°C , induce a pensar en un calentamiento interno, lo que nos permite imaginar de nuevo un mar subterráneo donde algún ser extremófilo lleve a cabo su actividad.

Con Tritón acabamos el breve repaso por los mejores candidatos de nuestro Sistema Solar a ser el soporte de desarrollo de algún tipo de vida. Como hemos podido ver, las mayores esperanzas las tenemos colocadas en el agua, tan imprescindible para la vida de la Tierra. Sí, el agua es una buena base de partida. Pero no tenemos mucho más.



Vista parcial del hemisferio norte de Tritón (Imagen: NASA, fair use)

En algún caso algo que pudiera considerarse como biomarcador, el metano, pero muy, muy lejos de una evidencia seria o con posibilidad de ser contrastada ¿decepcionante? Yo no diría esto, aunque nuestra ávida curiosidad necesita realidades. Estamos comenzando y nuestra tecnología nos ha dado ya muchas alegrías. Pero hay que ir a estos mundos para comprobar “in situ” qué es lo que hay allí ¿será un sondeo en Marte? ¿apostaremos todo a Europa y a que una sonda posada en su superficie conseguirá penetrar la capa de hielo hasta el océano subterráneo? Todo está abierto y nada cerrado.

La aventura en nuestro vecindario continúa. Quiero pensar, apoyado en todo lo que nos ha dicho la biografía de la Vida, que un extremófilo desconocido está allí esperándonos.

En el capítulo que sigue daremos un paseo por otro tipo de esfuerzos del hombre. Los que estamos haciendo para prolongar nuestras conjeturas más allá de nuestro sistema solar. Prolongar nuestras conjeturas y encontrar evidencias. Y si por estos lares la cosa está a medio cocer, imaginad lo crudo que está lo que vamos a ver, a pesar de los fantásticos avances de los últimos veinte años. Nos veremos en el mundo exterior.

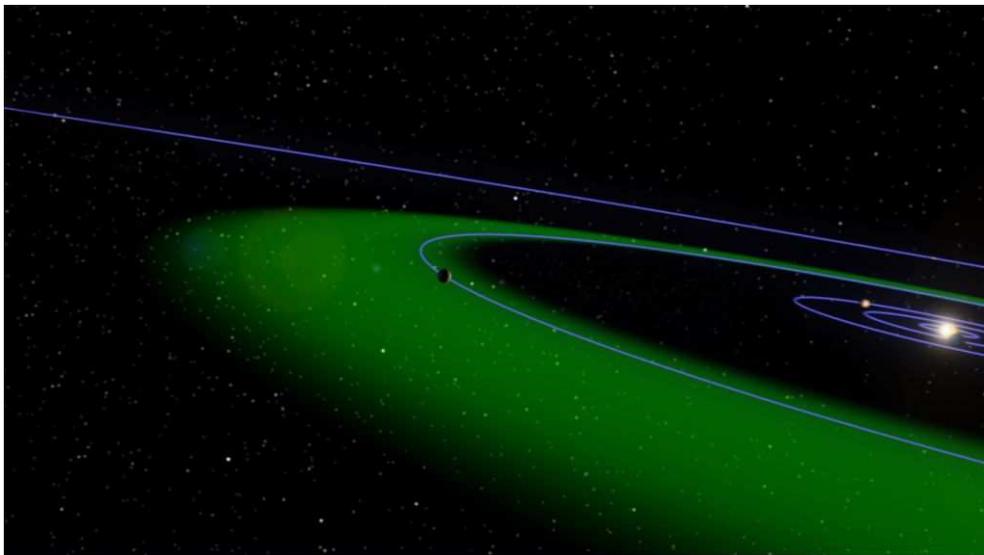
60. ¿Hay vida aún más lejos?

En los últimos capítulos nos hemos puesto a satisfacer una última curiosidad: ¿qué podemos decir de la Vida fuera de nuestro planeta? Hemos visto que, dada la inmensidad del Universo con todas sus estrellas y de lo sagaz que es la Vida para colonizar ámbitos extremos, cabía una cierta esperanza de que los organismos vivos de la Tierra estuviéramos acompañados en nuestro viaje. También hemos repasado nuestro entorno más cercano, dentro del Sistema Solar, por lo que hoy nos queda dar un nuevo paso y alejarnos a mucho más allá de cuatro años luz, que es donde ya se ve bien la primera estrella vecina, Alfa Centauri.

Demos por tanto un salto fuera de nuestro sistema planetario. Y sigamos teniendo en mente las inmensas posibilidades que nos ofrecen los extremófilos. El trabajo de la búsqueda pasa por encontrar planetas en sistemas estelares distintos al de nuestro Sol. Y los hemos encontrado, muchos, pero desgraciadamente en los que conocemos no tenemos claro que pudieran desarrollar una vida como la de la Tierra... a no ser que fuera alguno de los amantes de lo muy raro. Todo podría ser posible a lo largo de una investigación maratónica que aún se encuentra muy en sus inicios. Y el escenario es abrumadoramente extenso: el Universo, al menos el que queda dentro de nuestro campo de visión, una estupenda esfera de 46 mil millones de años luz de radio -un año luz es poco más o menos $9,5 \times 10^{12}$ kilómetros-.

Nos podemos preguntar cómo es posible, ya que si la edad del Big Bang es de 13.720 millones de años y la información viaja como mucho a la velocidad de la luz, ¿cómo nuestro horizonte de observación, donde se encuentran los más remotos confines desde los que pudo venir la luz más primitiva, está a un radio de 46 mil millones de años luz? La explicación es bien sencilla cuando se sabe: no sólo se mueve la información, sino también el escenario. Sabemos que el tejido espacio-tiempo, el escenario donde todo discurre, ha estado en continua expansión. Por así decirlo la trama de hilos donde se apoya la luz en su recorrido se ha expandido, se ha hecho más abierta, produciendo la ilusión sorprendente de que la última luz del primer día ha viajado hasta nosotros casi un 65% más deprisa de lo que se postula como su velocidad máxima.

Ya he comentado en otro capítulo que ahí dentro de este inmenso globo cósmico creemos que arden 7×10^{22} estrellitas, y posiblemente la mayoría de ellas con planetas: hay donde buscar. La teoría más elemental de esta búsqueda se apoya en algo que se conoce como “*Zona Goldilocks*”, zona de habitabilidad o la *zona Ricitos de Oro*. La guasa viene del cuento del mismo nombre, en el que la niña protagonista no encontraba la perfección en la solitaria casa de los ositos: la sopa de papá oso era demasiado fría, la de mamá oso demasiado caliente, la cama de uno muy dura y la de la otra muy blanda... y así iba fijando en todo su *zona Goldilocks*, que así es como se llamaba tan exquisita niña. La zona perfecta, ni un poco más allá ni un poco más aquí. Como parece ser el capricho de la Vida: solamente medra en aquellas zonas del espacio que cumplen sus estrictas especificaciones.

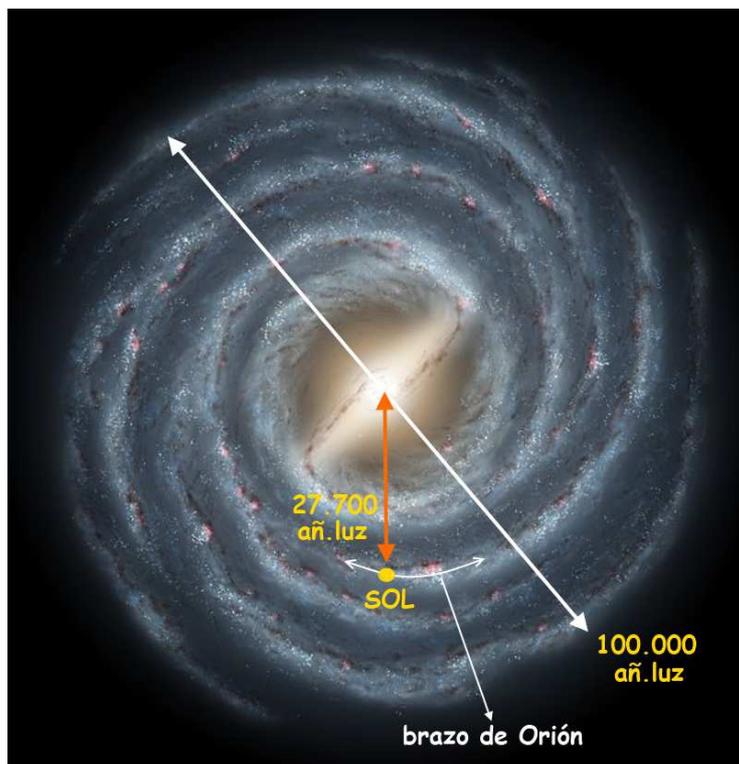


*Representación artística de la órbita del exoplaneta 55 Cancri-f dentro de la zona de habitabilidad -cinturón verde- de su estrella 55 Cancri
(Wikimedia, NASA, dominio público)*

La condición es que en esta zona privilegiada pueda mantenerse el agua en estado líquido. Se trata de un lugar del sistema planetario que no está ni muy cerca de la estrella, situación que favorece la evaporación del agua y su posterior barrido al espacio exterior, ni muy lejos, donde se congelaría y no serviría como diluyente universal para fabricar una “sopa primordial”. En el Sistema Solar ese rango de distancias se localiza entre 0,99 unidades astronómicas (UA) del Sol y 1,7 unidades astronómicas. Esto comprende las órbitas de la Tierra, a una distancia del Sol de 1,0 UA, y la de Marte, que se encuentra a un poco más de 1,5 UA del Sol. Con otro tipo de estrella, más joven o más vieja, más caliente o más fría, más grande o más

pequeña, todo varía. Además, aunque encontremos en el universo astros que lucen bien bajo el prisma de la habitabilidad, hay que tener en cuenta que la *zona Goldilocks* no es inmutable. En principio la anchura de la franja habitable y su variable posición a lo largo del tiempo están condicionadas por la forma en como vaya evolucionando su sol siguiendo el normal camino de envejecimiento. Por lo tanto, la permanencia en la zona para un planeta puede tener fecha de caducidad, quizás antes de que la Vida haya tenido tiempo para formar sus procesos sobre él.

Evidentemente el ancho y posición de esta franja habrá que matizarlo además con el tipo de atmósfera del planeta y su tamaño, que impone la intensidad de la gravedad, y a partir de ambas la presión atmosférica, el posible efecto invernadero y el albedo superficial. Puede que no se trate de un planeta rocoso o que su periodo orbital coincida con su día, es decir, dando siempre la misma cara, tórrida, hacia la estrella.



Posición del Sol en la Vía Láctea (a partir de imagen NASA, fair use)

Además, deberá encontrarse en una zona alejada del punto central de su galaxia o de regiones de intensa formación estelar, lugares ambos de alta emisión de radiación. Por suerte, nuestro Sol queda suficientemente alejado del centro de la Vía Láctea.

Y aún se nos pueden ocurrir otros condicionantes. Por ejemplo, que el planeta, a través de su tectónica o proceso similar, permita un ciclo del carbono que mantenga el equilibrio de la concentración de CO₂ atmosférico -fijación en los fondos marinos versus emisión por los volcanes- en un punto en el que el efecto invernadero no sea un problema catastrófico. O imaginar⁽¹⁶⁷⁾ una tal abundancia de elementos radioactivos en el manto que fuera suficiente como para incrementar la temperatura interior del cuerpo celeste y, en consecuencia, su habitabilidad en zonas frías fuera de la *Goldilocks*. Incluso se puede pensar que aunque un planeta no sea viable en general, quizás alguna zona privilegiada suya sí lo sea. Como la inmutable zona de tránsito entre la noche y el día en un planeta que siempre muestre el mismo hemisferio hacia su estrella por efecto de un acoplamiento de marea. Y por aportar también algún aspecto negativo, podemos pensar⁽¹⁶⁸⁾ en una atmósfera tan densa que la alta presión resultante impida la formación de agua líquida en la superficie del planeta “goldiloquiano”. La casuística es tan amplia como la imaginación.

Por todo ello resulta más fácil intentar cuantificar teóricamente los límites más allá de los cuales *no* puede desarrollarse la vida que decir dónde *sí* la hay. En este sentido hay una gran variedad de estudios al respecto que intentan acotar las condiciones de habitabilidad. Uno⁽¹⁶⁹⁾ muy interesante, cuyas premisas son la viabilidad de un ciclo del carbono y la existencia de agua líquida sobre la superficie, realizado sobre modelos de planetas con una composición parecida a la de la Tierra y en un intervalo de masas de entre 1 y 10 veces la de nuestro planeta, concluye que sólo sería viable la habitabilidad en aquellos con radio máximo 1,7 veces el de la Tierra para pequeñas masas, y de 2,2 masas para los más pesados. Otro estudio⁽¹⁷⁰⁾ analiza el tamaño máximo que deberá tener un planeta situado en órbita alrededor de una estrella del tipo G, como el Sol, a 1 Unidad Astronómica, de forma que su gravedad no sea lo suficientemente grande como para mantener a lo largo del tiempo la densa atmósfera inicial de hidrógeno, cosa que haría la vida imposible. Concluye que, aunque en los primeros años de la vida de los planetas se formara dicha atmósfera, por debajo de masas equivalentes a 1,5 la de la Tierra el hidrógeno será barrido por los vientos solares. Un tercer ejemplo lo encontramos en un estudio⁽¹⁷¹⁾ que determina que si una exoluna orbita a menos de diez veces el radio de su planeta no puede albergar vida.

Con todo lo anterior quedan introducidas las condiciones más básicas para que un exoplaneta sea habitable. Ahora **vamos a buscarlos**. Pero ¿cómo?

La tecnología llega en nuestra ayuda. Tecnología que nos permite observar un punto luminoso en el espacio a grandísima distancia, tecnología que nos permite analizar la luz de este punto, tecnología con la que sabemos el movimiento de este punto luminoso hasta percibir cualquier anomalía en su deambular. Básicamente hay dos procedimientos de estudiar una estrella lejana con el objeto de saber si le ronda algún planeta. Uno, el *método de la velocidad radial*, que se basa en la interacción gravitatoria entre dos astros, particularizando en estrella y planeta, que altera su movimiento teórico por el espacio. Cada uno da tirones al otro de forma no uniforme en el tiempo, de tal manera que cualquier anomalía en sus velocidades es un claro indicador de que hay vecinos. Otra técnica es analizar los cambios en la luminosidad de la estrella lo que indicará que un objeto opaco y brillante -algún planeta- deambula entre ella y nosotros, que la vemos desde la Tierra: lo que llamamos el *método del tránsito*. Recientemente se está aplicando también otra *metodología* basada en el efecto de *lente gravitacional* que una estrella realiza sobre alguna galaxia de fondo. Este efecto sufrirá ligeras variaciones según sea la posición del planeta con relación al de su estrella.

Aunque la búsqueda de exoplanetas es relativamente reciente -ya que en 1988 se descubrió el primero, Gamma Cephei Ab-, hoy en día disponemos de una potente herramienta dedicada a ello. El 7 de marzo de 2009 se lanzó al espacio el telescopio Kepler. Está diseñado para captar y estudiar imágenes de planetas “similares” a la Tierra con el objeto de determinar si es posible la vida en ellos. Mide continuamente el brillo de 156.453 estrellas y, aplicando el método del tránsito, determina si en alguna de estas estrellas puede haber un planeta. Si se considera que el dato es suficientemente interesante, desde tierra otros observatorios, aplicando el método de la velocidad radial, acaban de afinar los resultados.

A partir de los resultados contrastados de Kepler, en noviembre de 2013 se publicó un estudio⁽¹⁷²⁾ basado en un análisis estadísticos de los datos, que concluía que un 20% de las estrellas del tipo semejante al Sol pueden tener planetas del tamaño de la Tierra. Dado que aproximadamente el 20% de las estrellas son de tipo solar, podemos concluir que tan sólo en la Vía Láctea podrían encontrarse unos 4 mil millones de planetas parecidos al nuestro. Otra cosa es en qué posición “goldilock” se encuentran y cuáles son sus otras condiciones de habitabilidad. Y aún pudiendo ser favorables estas circunstancias, ello no quiere decir que necesariamente haya vida en ellos. La nómina de candidatos se verá realmente potenciada cuando seamos capaces de observar las exolunas que orbiten los exoplanetas gigantes, de

los que ya conocemos un abundante número situados en la zona habitable de sus estrellas.

En febrero de 2014 la NASA proporcionó la información más actualizada de Kepler. El número de exoplanetas descubiertos y confirmados como tales era de 1.783.

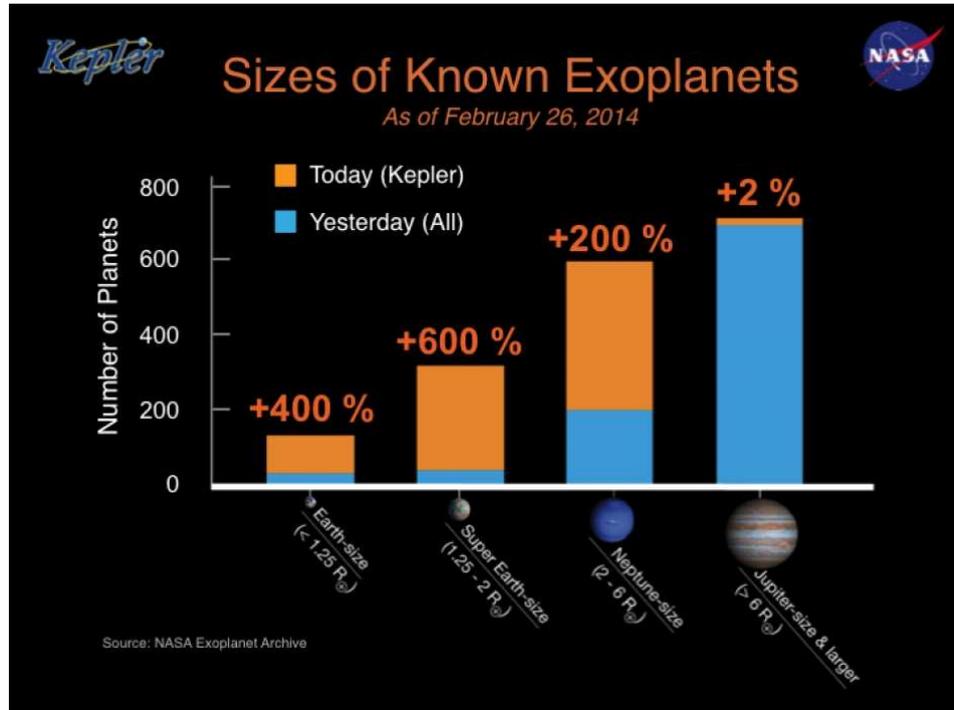


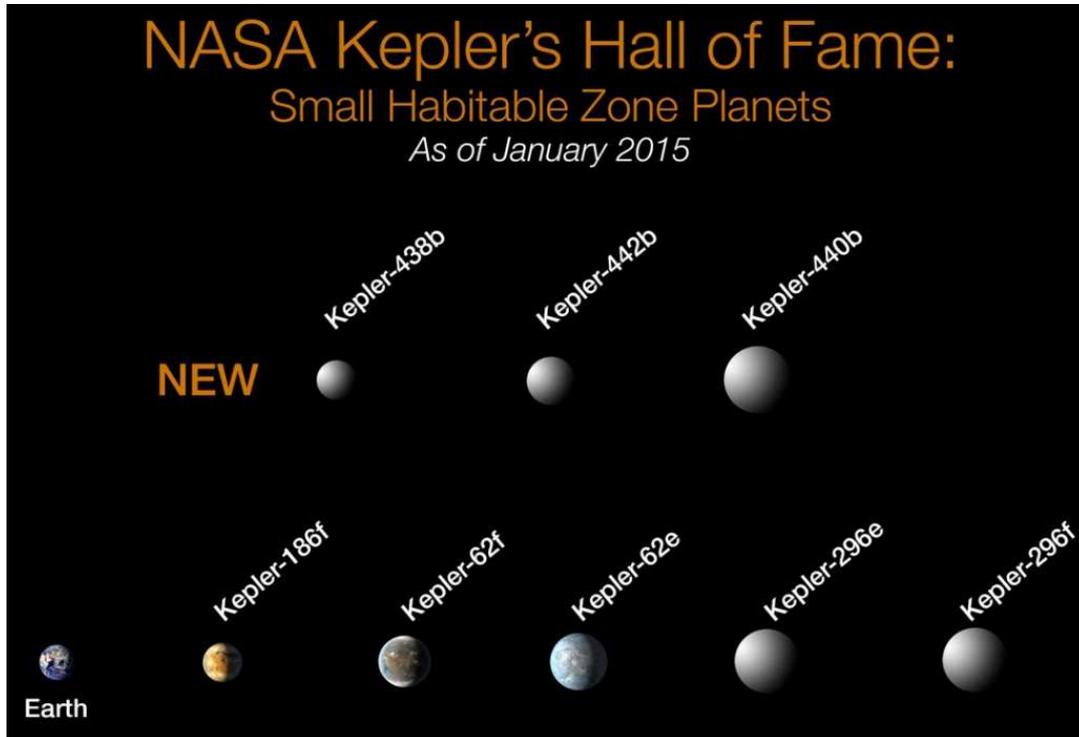
Diagrama resumen del número de planetas encontrados por Kepler, agrupados según su tamaño (Imagen: NASA, fair use)

Un 40% son gigantes gaseosos del tipo Júpiter que podrían acarrear una exoluna habitable, pero lo más importante es que una tercera parte son del tipo terrestre con un radio inferior al del doble del de la Tierra. Y de estos últimos, más de un 8% con tamaños muy similares ($R < 1,25 R_T$).

Kepler sigue trabajando, descubriendo y añadiendo nuevos exoplanetas a la nómina anterior. La NASA va actualizando casi diariamente su información⁽¹⁷³⁾, de forma que a finales de junio de 2015 reportaba la existencia de 1.854 planetas confirmados.

En la imagen siguiente podemos ver una selección de objetos planetarios individuales a partir de datos de enero de 2015. Se obtiene al aplicar a la lista total del telescopio Kepler el siguiente criterio⁽¹⁷⁴⁾ conservador de selección, definido en el Catálogo de Exoplanetas Habitables de la Universidad de Puerto Rico, en Arecibo: “*Un exoplaneta potencialmente*

habitable es un planeta extrasolar con una masa entre 0,1 y 10,0 veces la de la Tierra y un radio desde 0,5 a 2,0 el de la Tierra, orbitando además en la zona habitable de su estrella”.



Nómina de los exoplanetas conocidos que cumplen la definición conservadora para ser habitables. Es muy probable que su composición sea rocosa y con la temperatura correcta para contener agua líquida. Esta figura, por la fecha en que se realizó, no recoge a Kepler 452-b, el que puede ser hermano gemelo de la Tierra y del que hablamos más al final de esta entrada (Imagen: NASA Ames / W Stenzel, fair use)

El catálogo de la Universidad de Arecibo, con datos de junio de 2015, es ligeramente distinto al propuesto por la NASA y habla⁽¹⁷⁵⁾ de hasta 10 planetas habitables de características “terráqueas”.

Vamos a extendernos un poco más acerca del pionero entre los anteriores. Nos estamos refiriendo al exoplaneta Kepler 186-f. En el mes de abril de 2014 el SETI y la NASA dieron a conocer⁽¹⁷⁶⁾ la existencia de lo que parecía ser el primer planeta de tamaño terrestre situado en la zona habitable de su estrella Kepler 186.

El sistema planetario de esta enana roja es casi tan antiguo como el Sistema Solar (más de 4 mil millones de años) y se encuentra en la constelación del Cisne a unos 492,3 años luz de nosotros. Su tamaño como

estrella es aproximadamente la mitad del tamaño del Sol. Las enanas rojas son las estrellas más abundantes del Universo puesto que su conjunto agrupa aproximadamente las tres cuartas partes de todas las que existen.

La amabilidad con que este tipo de estrellas pueda recibir a la Vida es objeto de múltiples controversias y podéis obtener más información al respecto en este interesante artículo⁽¹⁷⁷⁾ de Wikipedia. Con objeto de agilizar la lectura al lector menos exigente, incluyo el primer párrafo del artículo mencionado, traducido libremente por mí mismo para facilitar su comprensión.

“La habitabilidad en los sistemas de las enanas rojas viene determinada por un considerable número de factores y causas diversas. Algunos son negativos, como pueden ser el bajo flujo energético estelar, la alta probabilidad de que se produzca acoplamiento de mareas, los pequeños tamaños de sus zonas habitables circumestelares y las variadas fluctuaciones de brillo que experimenta la estrella. El gran número de ellas en el universo y su longevidad pueden ser factores positivos para la habitabilidad de sus planetas. El estudiar cómo afectan estas circunstancias unas a otras en el ámbito de la habitabilidad va a ayudar a determinar la frecuencia de vida extraterrestre y de la inteligencia en estos sistemas“.

Volvamos ahora a Kepler 186-f. Y demos unas pinceladas sobre lo que sabemos de este exoplaneta. Pocas cosas en concreto.

Su tamaño es un poco superior al de la Tierra ya que su radio es de 1,13 veces el de nuestro planeta. Se cree que, dado su pequeño tamaño, pueda ser un planeta rocoso o incluso cubierto en su totalidad por un océano. De su atmósfera se conoce muy poco.

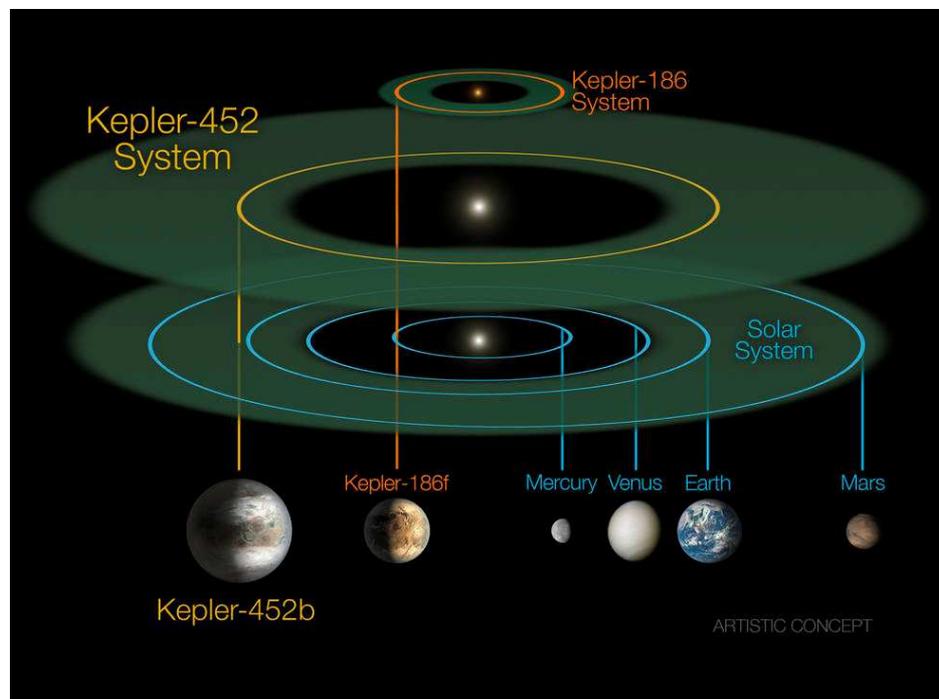
Su movimiento orbital anual dura 130 días terrestres y lo hace a unos 0,4 UA de su estrella, el 40% de como lo hace la Tierra alrededor del Sol. También, dada la distancia a su estrella, se cree que las mareas gravitacionales le afectan poco. Precisamente por estas dos razones se supone que rota sobre su eje y con una velocidad más lenta que la de la Tierra, pudiendo durar el giro “diario” hasta semanas.

El hecho de que se encuentre más cerca de su estrella que la Tierra del Sol no quiere decir que su temperatura sea muy caliente. A pesar de que su estrella es fría (superficie a unos 3.700 K) comparada con el Sol (superficie a unos 6.000 K), recibe de ella una energía equivalente al 32% de la que recibe la Tierra del Sol. Por comparar, Marte recibe el 43%.

Kepler 186-f fue el pionero. Pero por ahora el diploma de “hermano gemelo” más parecido a la Tierra lo posee Kepler 452-b que se encuentra a unos 1.400 años luz. La NASA reportó⁽¹⁷⁸⁾ en julio de 2015 el resultado de los análisis realizados sobre este planeta y su estrella. De forma muy resumida se trata de un planeta rocoso muy posiblemente con actividad volcánica, de un tamaño 60% superior al de la Tierra, un periodo orbital muy semejante -385 días- así como su radio -1,05 UA- que lo sitúa en plena zona habitable de su estrella. Y aquí está lo más interesante, esta última es muy semejante a nuestro Sol aunque unos mil millones de años más vieja.

En la siguiente imagen se hace una comparación entre las zonas habitables del Sol, de Kepler 186 y de Kepler 452. Como se podía esperar por el relativamente bajo flujo de energía que le llega de sus estrella, el planeta Kepler 186-f orbita muy próximo a la zona exterior de la franja habitable en su sistema, pero aún dentro del campo de posible existencia de agua en estado líquido. Y no puedo dudar que me resulta realmente excitante el ver el parecido del sistema planeta-estrella de Kepler 452-b con el de la Tierra-Sol.

Dicho esto, la imaginación es libre.



Comparación entre los sistemas Solar y los de Kepler 186 y Kepler 452 mostrando sus respectivas zonas de habitabilidad y los planetas que en ellas orbitan (Imagen: NASA, dominio público)

Bien. Hay que concluir que existen planetas en zonas con potencial para la Vida. Pero los indicios de vida son aún tan pobres que nos debemos preguntar de qué forma podemos afianzar esta etérea información. Deberíamos ser capaces de poder observar si realmente en estos astros hay indicios de biomarcadores de los que disertábamos en el capítulo anterior. Pero... ¡vamos a ver! Si casi no tenemos la suficiente tecnología para determinar si hay un exoplaneta y lo deducimos por procedimientos indirectos, ¿cómo voy a poder analizar el espectro de la luz que me llega del planeta? Porque su luz, llegar, llega, pero absolutamente enmascarada en la de su estrella.

¡Qué no se nos apodere la desesperanza! Con suma lentitud se está avanzando en el proyecto de nuevos telescopios con potencia suficiente como para observar exoplanetas, aunque lógicamente con ciertas limitaciones de resolución, y analizar el espectro de su luz. Uno de estos proyectos lo constituye el *European Extremely Large Telescope* (E-ELT). Se trata de un telescopio terrestre con un diámetro de 39 metros. Estará geográficamente situado en el desierto de Atacama, Chile. Otro gran proyecto en fase de desarrollo es el del *James Webb Space Telescope* (JWST), un observatorio espacial que estudiará el cielo en frecuencia infrarroja. Tendrá una gran resolución y su situación, más allá de la atmósfera de la Tierra, le permitirá observar longitudes de onda infrarrojas vedadas para los instrumentos terrestres, por lo que será un buen complemento del E-ELT.

Un futuro esperanzador dentro de la amenaza de las penurias económicas que frenan a estos ilusionantes y necesarios proyectos.

Y hasta aquí lo que sabemos hacer en este campo. Sigue la búsqueda sin desfallecer, a la espera de nuevas ayudas tecnológicas que nos amplíen el campo de visión: toda la Vía Láctea, otras galaxias de nuestro cúmulo vecinal e incluso más allá, sabiendo que muchas de las estrellas que vemos posiblemente se apagaron hace mucho. Las posibles conclusiones pueden cambiar el sentir de la humanidad. Alguno de nuestros hijos podrá disfrutar de la certeza de que hay vida física más allá de la nuestra.

Y aquí, en este punto, se acaba nuestro viaje. Ahora sí.

Solamente queda un capítulo más de recopilación y despedida, con una bibliografía que espero os sea útil. Tanto como lo ha sido para mí.

61. Últimas palabras

En el último capítulo de esta larga biografía de la Vida puse su punto final. Era el cierre de una larga experiencia que ha durado más de dos años y medio, a lo largo de los cuales no sólo he disfrutado trabajando con mis anotaciones y lecturas, preparando cada una de los capítulos de este libro, sino también, y de forma muy especial, con todos aquellos amigos con los que en el transcurrir del trabajo he cruzado comentarios y opiniones. En especial con los editores del blog “*El Cedazo*”, J (Javier Sedano) y John Macluskey, donde todos estos más de un millón de caracteres se han ido publicando entrada tras entrada. Con ellos y con todos vosotros, que habéis seguido con suma paciencia el deambular de unos sistemas químicos complejos que llamamos organismos vivos desde que eran tan sólo unos elementos independientes de la tabla periódica pululando por la vecindad del Universo hasta el momento actual, en que contemplamos un desmelenado árbol de parentescos, realidades e historias acabadas.



Así debió ser la masa madre de la Vida en nuestro planeta. Esta imagen corresponde a la nube molecular 1 de Tauro. (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

La Vida apareció en nuestro planeta. La evolución la fue disfrazando de alternativas viables, entre ellas las de un organismo reflexivo. Un organismo que se ha empeñado no sólo en desentrañar su historia familiar, sino que también su curiosidad le está llevando, como hemos visto en las

dos últimas entradas, a buscar más allá de sus fronteras la confirmación de que no está sólo en el Universo.

La esperanza es un juego. Nos aferramos a ella pero las fuerzas del Cosmos nos superan. Dijimos que el Sol dará su zarpazo definitivo dentro de 5.000 millones de años: se acabó lo que se daba, al menos en la Tierra. Y, para acabar de reforzar el caos, por esa misma época nos estaremos enlazando con la galaxia de Andrómeda. Ahora está a 2,5 millones de años luz, pero cuando el Sol empiece con sus tórridas e infernales flatulencias de gigante roja, la Vía Láctea y Andrómeda entremezclarán sus tenues materias. O quizás la fiesta empiece antes. No va a ser un choque brutal, ya que el vacío interestelar de las galaxias es inimaginable. Pero lo que sí es cierto es que la gravedad impondrá su ritmo de baile. Tras un largo periodo de caos, de estirones y empujones, posiblemente hayan mezclado sus entretelas para formar una nueva y mayor galaxia espiral, después de haber expurgado muchas estrellas, con sus sistemas planetarios incluidos, lanzadas para siempre al infinito vacío del espacio o eternamente perdidas en el agujero negro que habitará su centro.

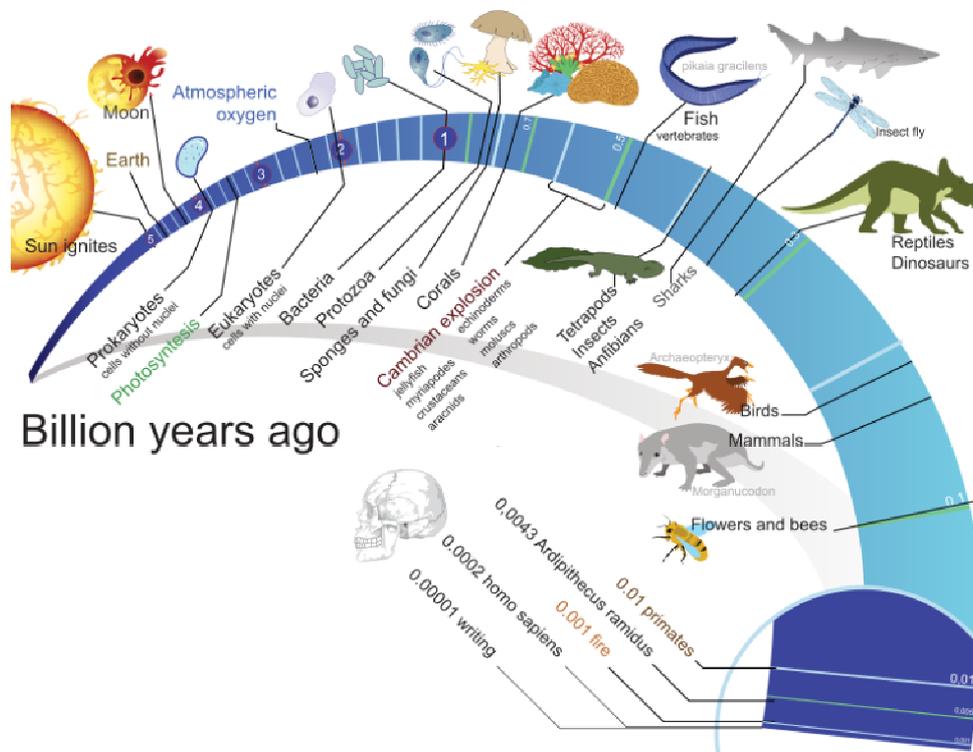
Mientras, el Universo seguirá su expansión iniciada con el Big Bang. La energía oscura –un misterioso 70% de lo que existe y que por ahora no sabemos lo que es- continuará con su eterna labor de abrir la trama del tejido espaciotemporal del Cosmos. Las galaxias más lejanas serán progresivamente transportadas sobre esta ola separadora hasta horizontes tan remotos que su luz ya no podrá llegar hasta nuestra Vía Láctea. A corta distancia, la gravedad frenará el efecto expansivo, pero será en vano, al final se habrán ido todos nuestros vecinos y quedará solamente la gran Vía Láctea-Andrómeda rodeada de soledad. Poco a poco, ni eso, el cielo se convertirá en una cueva de negritud, se mire a donde se mire, si es que por entonces hay alguien que pueda mirar. No se percibirá nada. El Universo habrá difuminado su temperatura mientras va cumpliendo su expansión, hasta llegar a una uniforme y congelada distribución en donde será imposible generar ningún trabajo, ningún acto energético que ordene de nuevo algo asimilable al orden de la Vida. Ni siquiera organismos con metabolismos ralentizados a casi el mínimo. Y todo habrá acabado.

Esta es la teoría, como también es la teoría la que dice que puede que seamos un grano de arena más en una inmensa playa de distintos universos, cada uno con sus especificidades fruto de la forma que les dio la fluctuación cuántica materna. Con otros tipos de vida o vacíos. Igual algún ser inteligente habrá encontrado el camino para emigrar a otro espacio

anexo al nuestro. De cualquier forma, nuestra aventura, la de la bacteria al hombre, pasando por los hongos y las plantas, fue bonita mientras duró.

Espero que el libro os haya interesado. No me atrevo a decir “fascinado”, pues cada uno tenemos nuestro particular criterio. Pero ésa es la emoción que despierta en mí cuando amplío mi mirada consciente y racional sobre los infinitos de la Vida y el Cosmos. Eso sí, al menos deseo que hayáis disfrutado un montón con él, tanto como yo he disfrutado mientras lo escribía.

Y ahora sí, me despido de vosotros. Y lo hago con la misma imagen con la que empezó el libro. Ha sido un placer y... quizás nos veamos de nuevo.



La gran y excitante aventura: Desde el “encendido solar” hasta el cráneo del Homo sapiens
(Wikipedia, dominio público)

ANEXO 1. Somera cronología de la Vida y la evolución

(Cronología aproximada en millones de años antes de hoy)

Cronología	Evento
4.570	Se inicia el sistema solar
4.400	Minerales más antiguos: circones
4.280	Rocas más antiguas: cinturón de Nuvvuagittuq, Candá
3.800	Formaciones rocosa más antiguas: Isua, Groenlandia
3.800 (? 4.100)	Se especula con indicios de vida en las rocas de Isua (? circones de Jack Hills, Australia): células procariotas
3.800	Inicio del eón Arcaico
3.500	Posibles fósiles más antiguos en los estromatolitos de Warrawoona, Australia
3.500	Fotosíntesis anoxygenica
2.800 (? 3.460)	Comienza la fotosíntesis oxigenica
2.700	Estromatolitos con evidencias de cianobacterias
2.500	Comienza el eón Proterozoico
2.400	Evidencias de fósiles de bacterias en Pilbara, Australia
2.400	Fin de la Gran Oxidación
2.320	Cianobacterias oxigenadoras
2.300	Glaciación Huroniana
2.100	Fósil más antiguo eucariota
2.100	Fósil más antiguo pluricelular
? 2.100	Radiación de las plantas
2.000	Huellas del inicio de acumulación de oxígeno en la atmósfera
1.200	Fósil más antiguo con reproducción sexuada
1.100	Inicio de la radiación de los hongos
850	Se inicia el despegue definitivo del oxígeno en la atmósfera
710	Glaciación general del planeta conocida como " <i>Tierra bola de nieve</i> "
? 700	Radiación del primer sistema muscular de tipo reticular.
? 700	Primer sistema nervioso de tipo reticular
637	Evidencias bioquímicas de esponjas
630	Radiación de la simetría bilateral

Cronología	Evento
600	Fauna Ediacara
? 580	Primer sistema circulatorio en forma de cavidad gastrovascular con ramificaciones
570	Primeras evidencias fósiles de esponjas y cnidarios
570	Radiación de los celomados
550	Fósil más antiguo de un animal bilateral ¿ <i>Kimberella</i> ?
542	Inicio del Cámbrico
540	Explosión del Cámbrico
? 540	Inicio de la digestión extracelular y del aparato digestivo elemental
536	Fósil más antiguo de lobopodo. Primer artrópodo
525	Fósil de <i>Haikouella</i> primer cordado
? 525	Primeras branquias
505	Fósil de <i>Pikaia</i> primer vertebrado
500	Primeros dientes en el <i>Conodonta</i>
488	Inicio del Ordovícico
475	Fósil más antiguo de pez. Ostracodermo sin mandíbula.
470	Primeras esporas fósiles
470	Primeras plantas terrestres
460	Fósil más antiguo de hongo
450	Extinción masiva del Ordovícico
444	Inicio del Silúrico
430	Primeros peces con esqueleto óseo
420	Fósil más antiguo de planta vascular
420	Fósil más antiguo de artrópodo terrestre
416	Aparecen los peces con mandíbula
416	Fin del Silúrico y comienzo del Devónico
410	Fósiles más antiguos de hexapodos
? 400	Aparición del cartílago como elemento estructural en los animales
390	Fósil más antiguo de pez con aletas lobuladas
380	Fósil más antiguo de arácnido
375	Primer vertebrado que sale del agua a tierra: <i>Tiktaalik</i> . Comienzan los tetrápodos
370	Fósiles más antiguos de plantas con semillas
364	Última extinción del Devónico
359	Inicio del Carbonífero
359	Los anfibios conquistan la tierra
319	Aparecen las plantas gimnospermas
320	Aparece el huevo amniótico

Cronología	Evento
320	Fósil más antiguo de reptil
310	Primeras trazas de insectos voladores: aparecen las alas
299	Inicio del Pérmico
260	Aparecen los cinodontos, reptil mamíferoide ancestro de los mamíferos
260	Aparecen los reptiles <i>Archosauria</i> , ancestros entre otros de los dinosaurios, aves y cocodrilos
252	Extinción masiva del Pérmico-Triásico
251	Inicio del Triásico
250	Aparecen los dípteros
230	Aparecen los primeros dinosaurios
228	Conquista del vuelo por un gran reptil: el orden <i>Pterosauria</i>
200	Aparecen los reptiles lepidosaurios ancestros de los actuales reptiles con escamas
200	Extinción del Jurásico-Triásico
200	Inicio del Jurásico
195	Aparecen los primeros mamíferos
163	Aparecen dinosaurios con plumas
160	Fósil más antiguo de mamífero placentario
150	Primer dinosaurio/ave volador: <i>Archaeopteryx</i>
145	Inicio del Cretácico
140	Primeros pólenes fósiles de angiospermas
140	Aparición de las flores
125	Fósil más antiguo de plantas angiospermas
125	Aparecen las aves: <i>Enatiornithes</i>
125	Fósil más antiguo de mamífero marsupial
100	Aparece la sociabilidad en los insectos
100	Fósil más antiguo de mamífero monotrema
65	Radiación de los <i>Neornithes</i> : pájaros modernos
65	Aparición de los primeros frutos carnosos
65	Extinción masiva del Cretácico-Terciario (K/T)
55	Recuperación y especiación de los mamíferos tras la crisis K/T
45	Algunos mamíferos retornan al agua: cetáceos
35	Primeros hielos sobre la Antártida
20	Inicios del Rift africano
18	Inicio de la familia de los hominoideos
10	Inicio de la familia de los homínidos
3	Cierre del istmo de Panamá

Cronología	Evento
2,2	<i>Homo habilis</i>
1,8	Primeras salidas de <i>Homo</i> fuera de África

ANEXO 2. Bibliografía y fuentes de información

Libros y publicaciones, he leído unos cuantos, y siempre han llegado a mis manos de la manera más aleatoria e impensada, lecturas anteriores, referencias cogidas al hilo, simples casualidades.

En cuanto a mis fuentes de información, han sido variadas. No voy a negar que internet sea un pozo sin fondo, en el que hay que cosechar con mucho cuidado. Wikipedia me ha centrado muchas veces, tanto en su versión en castellano como en su versión inglesa, mucha más rica en la mayoría de las ocasiones. Mis blogs favoritos me han iluminado, motivado y entretenido. Suelen tener administradores serios, bien preparados y amenos, y son buenos divulgadores, ya que se les nota enamorados de lo que transmiten. Y transmiten cosas fundamentadas. Así que mi agradecimiento por la parte que les toca en mi “desborricamiento”. Son especiales para mí mi blog maestro “El Tamiz” de Pedro Gómez-Esteban, así como la “La pizarra de Yuri” de Antonio Cantó. Y, cómo no, “Nautas” de Miguel Artime, Javier Peláez y Antonio Martínez, este último el alma mater de “Fogonazos”. Dentro de la comunidad Naukas he encontrado grandes maestros, como Daniel Marín, César Tomé López, Juan Ignacio Pérez, Jesús Espí y muchos otros. “Neofronteras”, del enigmático doctor en físicas J.J., “La ciencia y sus demonios” de Manuel Carmona y otros, “Materia” de siete comprometidos con la ciencia comandados por Patricia Fernández de Lis, “Este punto azul pálido” de Daniel Torregrosa... y muchos más, como “Arqueología Cognitiv” de Ángel Rivera, “Crónica de Arqueología” del exhaustivo Iván Díaz, “Reflexiones de un primate” del gran antropólogo y humanista José María Bermúdez de Castro, “Paleos” de Christofer Taylor, los mapas geológicos “Paleomap” de Scotese o los de Ronald Blakey en “Colorado Plateau Geosystems”, dibujos y esquemas de autores anónimos o conocidos, de los que he aprendido y hecho uso, a veces adaptándolos a lo que me parece un mejor entendimiento, y siempre con la mejor referencia de sus creadores que he podido encontrar. Y muchos más.

Mi bibliografía particular sobre el tema ha ido creciendo apuntándome a cualquier referencia de calidad, que indudablemente me llevaba a una nueva publicación, amena o ardua, que me abría nuevos horizontes... hay tanto para leer que da vértigo. De todas formas, ahí va una lista, más que parcial y personal.

- Origen e historia de la Tierra: Francisco Anguita Virilla
- Amalur: del átomo a la mente: Juan Luis Arsuaga e Ignacio Martínez
- La especie elegida: Juan Luis Arsuaga e Ignacio Martínez
- El enigma de la esfinge: Juan Luis Arsuaga
- Fotosíntesis: Isaac Asimov
- La evolución del talento: José María Bermúdez de Castro
- Orígenes: El universo, la vida, los humanos: José María Bermúdez de Castro, Carlos Briones y Alberto Fernández
- Una breve historia de casi todo: Bill Bryson
- La cadera de Eva: José Enrique Campillo Álvarez
- Planeta humano: Eudald Carbonell y Robert Sala
- Cell evolution and Earth history: stasis and revolution: Thomas Cavalier-Smith
- Por qué la teoría de la evolución es verdadera: Jerry A. Coyne
- Y el cerebro creó al hombre: Antonio Damasio
- Teoría de la evolución: Charles Darwin
- El gen egoísta: Richard Dawkins
- El relojero ciego: Richard Dawkins
- El río del Edén: Richard Dawkins
- Escalando el monte improbable: Richard Dawkins
- Evolución: Richard Dawkins
- The ancestor's tale: Richard Dawkins
- On the antiquity of language: the reinterpretation of Neandertal linguistic capacities and its consequences: Dan Dediu et al.
- Armas, gérmenes y acero: Pared Diamond
- Flora y vegetación durante el Jurásico y el Cretácico: Carmen Diéguez
- The origin of the Metazoa in the light of the Proterozoic fossil record: Mikhail A. Fedonkin
- Breve historia del hombre: Fernando Díez Martín
- Los orígenes de la vida: Freeman J. Dyson
- El registro paleobotánico y el tránsito Pérmico-Triásico: José Bienvenido Ferrer
- Life, an unauthorised biography: Richard Fortey
- The earth, an intimate history: Richard Fortey
- La conjura de los machos: Ambrosio García Leal
- El sexo de las lagartijas: Ambrosio García Leal
- Desde Darwin: Stephen Jay Gould
- La adaptación biológica: Stephen Jay Gould

- La vida maravillosa: Stephen Jay Gould
- De animales a dioses: Yuval Noah Harari
- Historia de un átomo: Lawrence Krauss
- Life ascending: Nick Lane
- Nuestros orígenes, en busca de lo que nos hace humanos: Richard Leakey y Roger Lewin
- Astrobiología: Bartolo Luque y otros
- Captando genomas: Lynn Margulis
- Cinco reinos, guía ilustrada de los phyla de la vida en la Tierra: Lynn Margulis y Karlene Schwartz
- Planeta simbiótico: Lynn Margulis
- On the origin of cells: William Martin y Michael J. Russell
- The major transitions in evolution: John Maynard Smith y Eörs Szathmáry
- Teoría de la evolución: John Maynard Smith
- Los primeros europeos: Mario Menéndez Fernández
- Beginnings of Cellular Life: Harold J. Morowitz
- Energy Flow in Biology: Harold J. Morowitz
- The emergence of everithing: Harold J. Morowitz
- El mono desnudo: Desmond Morris
- El origen de la vida: Aleksandr Ivánovich Oparin
- What is Life? How Chemistry Becomes Biology: Addy Pross
- Arqueología del lenguaje. La conducta simbólica en el Paleolítico: Ángel Rivera Arrizabalaga
- Arqueología cognitiva. Origen del simbolismo humano: Ángel Rivera Arrizabalaga
- The universe within. A scientific adventure: Neil Shubin
- Your inner fish: Neil Shubin
- Human Physiology: Dee Unglaub Silverthorn
- The resilient earth: Allen Simmons y Doug L. Hoffman
- La maldición de Adán: Bryan Sykes
- Las siete hijas de Eva: Bryan Sykes
- The variety of life: Colin Tudge
- Historia del clima de la Tierra: Antón Uriarte
- Evolución amniota y la evolución de los vertebrados: Maricela Villagrán Santa Cruz
- Primates y Filósofos: La Evolución de la Moral del Simio al Hombre: Franz de Waal
- Eukaryotes and multicells. Origin: Ben Waggoner
- El enigma de los dinosaurios: J N. Wilford

ANEXO 3. Notas

- (1) http://www.csic.es/web/guest/noticias-y-multimedia?p_p_id=contentviewerservice_WAR_alfresco_packportlet&p_p_lifecycle=1&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_contentviewerservice_WAR_alfresco_packportlet_struts_action=%2Fcontentviewer%2Fview&_contentviewerservice_WAR_alfresco_packportlet_nodeRef=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F4257442a-cb83-46d2-9aa5-5697f292dd91&_contentviewerservice_WAR_alfresco_packportlet_gs_a_index=false&_contentviewerservice_WAR_alfresco_packportlet_title=noticias&contentType=news
- (2) <http://www.nature.com/ngeo/journal/v7/n3/full/ngeo2075.html>
- (3) <http://www.pnas.org/content/112/47/14518.abstract>
- (4) <http://www.pnas.org/content/106/19/7780.abstract>
- (5) <http://quevidaesta2010.blogspot.com.es/2015/02/las-matematicas-de-la-conducta.html>
- (6) <http://www.pnas.org/content/110/6/2135>
- (7) <http://www.nature.com/nchem/journal/v7/n4/full/nchem.2202.html>
- (8) <http://www.nature.com/nature/journal/v491/n7422/full/nature11549.html>
- (9) <http://www.nature.com/ngeo/journal/v2/n4/full/ngeo465.html>
- (10) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X15005270>
- (11) <http://web.archive.org/web/20070929092119/http://ijs.sgmjournals.org/cgi/reprint/52/2/297.pdf>
- (12) <http://online.liebertpub.com/doi/pdfplus/10.1089/ast.2013.1030>
- (13) <http://www.pnas.org/content/112/16/4859.full.pdf>
- (14) <http://www.nature.com/scitable/topicpage/the-origin-of-plastids-14125758>
- (15) <http://www.nature.com/nature/journal/v440/n7080/full/nature04531.html>
- (16) <http://www.pnas.org/content/112/7/E693.abstract>
- (17) <http://www.nature.com/nature/journal/v521/n7551/abs/nature14447.html>
- (18) <http://www.nature.com/nature/journal/v466/n7302/full/nature09166.html>

- (19) http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-90-481-3799-2_4
- (20) <http://www.pnas.org/content/109/5/1595.full.pdf>
- (21) <http://www.nature.com/nature/journal/v466/n7302/full/nature09166.html>
- (22) <https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/19150/SCtP-0094.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- (23) <http://news.mit.edu/2011/snowball-earth-life-0615>
- (24) <http://www.nature.com/nature/journal/v457/n7230/full/nature07673.html>
- (25) <http://www.cbc.ca/m/touch/technology/story/1.1225497>
- (26) <http://ucrtoday.ucr.edu/3880>
- (27) https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=osu1275489532&disposition=inline
- (28) <http://www.mycologia.org/content/98/6/838.full.pdf>
- (29) <http://www.nature.com/ngeo/journal/v3/n9/full/ngeo934.html>
- (30) https://www.researchgate.net/publication/278016030_First_Evidence_for_locomotion_in_the_Ediacara_biota_from_the_565_Ma_Mistaken_Point_Formation_Newfoundland
- (31) <http://www.scotese.com/climate.htm>
- (32) <http://www.bristol.ac.uk/news/2014/march/ancient-sea-creatures.html>
- (33) <http://www.timetree.org/public/data/pdf/Pisani2009Chap29.pdf>
- (34) <http://www.sciencemag.org/content/345/6202/1365>
- (35) <http://www.nature.com/nature/journal/vaop/ncurrent/full/nature13414.html>
- (36) <http://www.bristol.ac.uk/news/2013/9830.html>
- (37) <http://www.rpgroup.caltech.edu/courses/aph161/Handouts/Nilsson1994.pdf>
- (38) <http://www.sciencemag.org/content/334/6053/222.abstract?sid=394399c6-2ffa-4c3e-ae8-b9972cd40f68>
- (39) <http://www.sciencemag.org/content/329/5989/339.abstract>
- (40) <http://www.nature.com/news/marine-worm-rewrites-theory-of-brain-evolution-1.10226>
- (41) <http://www.nature.com/nature/journal/v490/n7419/full/nature11495.html>
- (42) <http://www.nature.com/ncomms/2014/140407/ncomms4560/full/ncomms4560.html>
- (43) <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.2010.03433.x/pdf>
- (44) <http://www.scotese.com/climate.htm>
- (45) <http://news.sciencemag.org/2015/09/how-enamel-coating-your-teeth-evolved-ancient-fish-scales>

- (46) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016895259801662X>
- (47) <https://www.newscientist.com/article/dn11701-mystery-prehistoric-fossil-verified-as-giant-fungus/>
- (48) <http://www.mycologia.org/content/98/6/838.full.pdf>
- (49) <http://www.nature.com/nature/journal/v453/n7195/full/nature06966.html>
- (50) <http://www.nature.com/nature/journal/v505/n7482/full/nature12826.html>
- (51) <http://www.pnas.org/content/109/13/4927.full.pdf>
- (52) <http://www.pnas.org/content/108/16/6515.figures-only>
- (53) <http://www.pnas.org/content/108/16/6515>
- (54) <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0045779>
- (55) <http://news.mit.edu/2014/ancient-whodunit-may-be-solved-microbes-did-it>
- (56) <http://www.sciencemag.org/content/348/6231/229.abstract>
- (57) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703712001457>
- (58) <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008GC002149/abstract;jsessionid=FD6AB778CD33A991FF3096FC97ACC124.f02t03?wollURL=/doi/10.1029/2008GC002149/abstract®ionCode=ES&identityKey=47ec06f2-7b11-47f6-b413-7b401f9360af>
- (59) <http://www.sciencemag.org/content/338/6105/366.short>
- (60) [http://www.isez.pan.krakow.pl/journals/azc_i/pdf/46\(suppl\)/18.pdf](http://www.isez.pan.krakow.pl/journals/azc_i/pdf/46(suppl)/18.pdf)
- (61) <http://rsbl.royalsocietypublishing.org/content/9/1/20120949>
- (62) <http://www.agenciasinc.es/Noticias/Los-primeros-dinosaurios-aparecieron-poco-despues-de-sus-precursores>
- (63) <http://rsbl.royalsocietypublishing.org/content/9/1/20120949>
- (64) <http://www.nature.com/nature/journal/v523/n7562/full/nature14472.html>
- (65) <http://www.killerinourmidst.com/Gallery.html>
- (66) <http://www.karencarr.com/portfolio-images/Dinosaurs-and-ancient-life/Triassic/Sam-Noble-Oklahoma-Museum-of-Natural-History/Triassic-Landscape/391>
- (67) <http://www.sciencemag.org/content/340/6135/941.abstract?sid=56afcea4-938f-4f40-a2c9-a1c99c9c5508>
- (68) <http://instaar.colorado.edu/~marchitt/reprints/hoenischscience12.pdf>
- (69) <http://www.scientificamerican.com/gallery/earliest-pollinator/>
- (70) <http://www.nature.com/ncomms/2015/150127/ncomms6996/full/ncomms6996.html>

- (71) <http://www.aaas.org/news/science-sniff-sniff-smelling-led-smarter-mammals>
- (72) <http://www.sciencemag.org/content/332/6032/955>
- (73) <http://www.nature.com/nature/journal/v487/n7407/full/nature11264.html>
- (74) <http://www.sciencemag.org/content/310/5755/1800>
- (75) <http://www.nature.com/nature/journal/v261/n5556/pdf/261129a0.pdf>
- (76) <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/274/1626/2711.full#ref-3>
- (77) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982212003296>
- (78) <http://www.sciencemag.org/content/345/6196/562.short>
- (79) <http://www.madrimasd.org/informacionidi/noticias/noticia.asp?id=53042>
- (80) <http://www.sciencemag.org/content/345/6195/451>
- (81) <http://phenomena.nationalgeographic.com/2012/10/25/bird-mimic-dinosaur-hints-that-wings-evolved-for-show-not-flight/>
- (82) <http://www.pnas.org/content/112/35/10985>
- (83) https://www.academia.edu/1424953/Cretaceous_forest_composition_and_productivity_inferred_from_a_global_fossil_wood_database
- (84) http://www.jstor.org/stable/10.1086/374193?seq=1#page_scan_tab_contents
- (85) <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2013.00344/abstract>
- (86) <http://www.pnas.org/content/106/22/8929>
- (87) <http://www.bioone.org/doi/abs/10.1554/0014-3820%282003%29057%5B0216%3AMOTAFG%5D2.0.CO%3B2>
- (88) <http://www.pnas.org/content/97/26/14421>
- (89) http://www.sea-entomologia.org/PDF/BOLETIN_26/B26-035-521.pdf
- (90) <http://www.sciencemag.org/content/314/5799/614>
- (91) http://www.jstor.org/stable/1306333?seq=1#page_scan_tab_contents
- (92) http://www.sea-entomologia.org/PDF/BOLETIN_26/B26-050-713.pdf
- (93) <http://zookeys.pensoft.net/articles.php?id=4342>
- (94) <http://www.nature.com/nature/journal/v476/n7361/full/nature10291.html>
- (95) [http://luo-lab.uchicago.edu/pdfs/Luo-et-al\(2003\).pdf](http://luo-lab.uchicago.edu/pdfs/Luo-et-al(2003).pdf)
- (96) http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S0004-48222007000400011&script=sci_arttext
- (97) <http://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.1000436>

- (98) <http://www.sciencemag.org/content/339/6120/662.abstract>
- (99) <http://www.nature.com/nature/journal/v462/n7274/full/nature08555.html>
- (100) https://www.researchgate.net/publication/272568440_Computational_fluid_dynamics_simulations_of_the_Zanclean_catastrophic_flood_of_the_Mediterranean_533_Ma
- (101) <http://www.sciencemag.org/content/309/5734/600.figures-only>
- (102) <http://lorraine-lisiecki.com/LisieckiRaymo2005.pdf>
- (103) <http://www.nature.com/nature/journal/v399/n6735/abs/399429a0.html>
- (104) <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3271923/>
- (105) <https://www.nceas.ucsb.edu/~alroy/pdfs/2004-EER-6-1.pdf>
- (106) <http://www.nature.com/nature/journal/v488/n7409/full/nature11300.html>
- (107) <http://www.nature.com/nature/journal/v460/n7255/full/nature08224.html>
- (108) https://www.academia.edu/2090508/NEW_BOTHREMYDID_TURTLE_TESTUDINES_PLEURODIRA_FROM_THE_PALEOCENE_OF_NORTHEASTERN_COLOMBIA
- (109) <http://www.nature.com/nature/journal/v457/n7230/extref/nature07671-s1.pdf>
- (110) <http://www.stonybrook.edu/sb/images/features/oleary130208.pdf>
- (111) <http://bmcevolbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2148-7-224>
- (112) <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2291119/>
- (113) <http://link.springer.com/article/10.1007/s12052-009-0135-2/fulltext.html>
- (114) <http://www.elcomercio.es/gijon/20090422/mas-actualidad/sociedad/descubren-posible-eslabon-perdido-200904221823.html>
- (115) <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/early/2011/10/08/rspb.2011.1732>
- (116) <http://espanol.umich.edu/noticias/comunicados-de-prensa/2006/07/25/calentamiento-global-de-tiempos-remotos-dispersa-a-primates-primitivos/>
- (117) <http://www.nature.com/nature/journal/v520/n7548/full/nature14120.html>
- (118) [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(199908\)109:4%3C541::AID-AJPA9%3E3.0.CO;2-N/abstract;jsessionid=95672A944F1E45E381DD5793635859BC.f04t02](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1096-8644(199908)109:4%3C541::AID-AJPA9%3E3.0.CO;2-N/abstract;jsessionid=95672A944F1E45E381DD5793635859BC.f04t02)

- (119) <http://www.sciencedaily.com/releases/1998/08/980807105043.htm>
- (120) <http://anthropology.utoronto.ca/Faculty/Begun/begunSciAm.pdf>
- (121) https://www.researchgate.net/publication/235705248_Hydrologic_cycling_over_Antarctica_during_the_middle_Miocene_warming
- (122) <http://www.nature.com/nature/journal/v519/n7541/full/nature14224.html>
- (123) <http://reflexiones-de-un-primate.blogs.quo.es/2015/01/29/homohabilis-y-el-selecto-club-de-los-elegidos/>
- (124) <http://reflexiones-de-un-primate.blogs.quo.es/2015/01/29/homohabilis-y-el-selecto-club-de-los-elegidos/>
- (125) <http://www.nature.com/nature/journal/v521/n7552/full/nature14464.html>
- (126) <http://www.nature.com/nature/journal/v517/n7536/full/517531a.html#close>
- (127) <http://www.sciencedaily.com/releases/2015/03/150304141454.htm>
- (128) <http://www.indiana.edu/~origins/X-PDF/Semaw2000.pdf>
- (129) <http://www.nature.com/nature/journal/v519/n7541/full/nature14224.html>
- (130) <http://elifesciences.org/content/4/e09560>
- (131) <http://reflexiones-de-un-primate.blogs.quo.es/2015/02/24/las-primeras-poblaciones-de-china/>
- (132) <http://www.nature.com/nature/journal/v468/n7327/abs/nature09710.html>
- (133) <http://www.elmundo.es/ciencia/2013/12/18/52b1e1c3268e3e083f8b459d.html>
- (134) <http://www.sciencemag.org/content/342/6156/321.summary>
- (135) <http://www.nature.com/news/mystery-humans-spiced-up-ancients-sex-lives-1.14196>
- (136) <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ajpa.22641/abstract?deniedAccessCustomisedMessage=&userIsAuthenticated=false>
- (137) <http://www.sciencemag.org/content/344/6190/1358>
- (138) <http://www.nature.com/news/mystery-humans-spiced-up-ancients-sex-lives-1.14196>
- (139) <http://www.nature.com/nature/journal/v526/n7575/full/nature15696.html>
- (140) <http://www.nature.com/nature/ancestor/pdf/325031.pdf>
- (141) <http://www.sciencemag.org/content/341/6145/562.abstract>
- (142) <https://www.sciencemag.org/content/341/6145/565>
- (143) <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3113241/>
- (144) [http://www.cell.com/ajhg/abstract/S0002-9297\(13\)00073-6?cc=y?cc=y](http://www.cell.com/ajhg/abstract/S0002-9297(13)00073-6?cc=y?cc=y)
- (145) <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3174671/>

- (146) <http://www.lapizarradeyuri.com/2014/02/15/el-apocalipsis-improbable/>
- (147) <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/3085885.stm>
- (148) <http://www.agenciasinc.es/Noticias/Triplican-el-numero-de-estrellas-del-universo>
- (149) <http://astrorhysy.blogspot.com.es/2013/04/infographic-galaxy-size-comparison-chart.html>
- (150) <http://www.mso.anu.edu.au/~charley/papers/LineweaverDavis.pdf>
- (151) <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002JE001918/abstract?wol1URL=/doi/10.1029/2002JE001918/abstract®ionCode=ES&identityKey=47ec06f2-7b11-47f6-b413-7b401f9360af>
- (152) https://www.researchgate.net/publication/227785838_Facts_and_fiction_about_long-term_survival_in_tardigrades
- (153) <http://www.pnas.org/content/early/2015/11/18/1510461112>
- (154) <http://jeb.biologists.org/content/200/3/467.abstract>
- (155) <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC177705/pdf/1780633.pdf>
- (156) <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1109/1109.6590.pdf>
- (157) <http://ijs.microbiologyresearch.org/content/journal/ijsem/10.1099/ijs.0.02503-0#tab2>
- (158) <http://www.lanasa.net/news/marte/la-nasa-confirma-la-evidencia-de-agua-liquida-en-marte/>
- (159) <http://danielmarin.naukas.com/2015/09/28/la-nasa-confirma-la-existencia-de-agua-liquida-en-la-superficie-de-marte-si-otra-vez/>
- (160) <https://www.astrobiology.nasa.gov/articles/2004/4/7/methane-on-mars-a-possible-biomarker/>
- (161) http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Mars_Express/Mars_Express_confirms_methane_in_the_Martian_atmosphere
- (162) <http://news.nationalgeographic.com/news/2013/09/130919-mars-curiosity-methane-nasa-habitable-rover/>
- (163) <http://www.abc.es/20091009/ciencia-tecnologia-espacio-sistema-solar/oceano-planeta-europa-contiene-200910091200.html>
- (164) <http://www.sciencemag.org/content/345/6197/673>
- (165) <https://www.sciencemag.org/content/344/6179/78>
- (166) <http://www.nature.com/nature/journal/v519/n7542/full/nature14262.html>
- (167) <http://www.nature.com/nature/journal/v519/n7542/full/nature14262.html>
- (168) <http://mnras.oxfordjournals.org/content/439/4/3225.full.pdf+html>
- (169) <http://arxiv.org/pdf/1311.3039v1.pdf>
- (170) <http://arxiv.org/pdf/1401.2765v1.pdf>
- (171) <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1209/1209.5323.pdf>

- (172) <http://www.pnas.org/content/110/48/19273.full.pdf>
- (173) <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>
- (174) <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/methods>
- (175) <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>
- (176) <http://www.sciencemag.org/content/344/6181/277>
- (177) https://en.wikipedia.org/wiki/Habitability_of_red_dwarf_systems
- (178) <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-kepler-mission-discovers-bigger-older-cousin-to-earth>

