

EVOLUCIÓN DEL MUNDO Y LA VIDA

ISBN: 978-958-8958-32-3



Universidad de **Nariño**
EDITORIAL UNIVERSITARIA

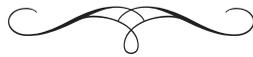


CEPUN

J. ERNESTO LUQUE T.

J. ERNESTO LUQUE T.

EVOLUCIÓN
DEL MUNDO Y LA VIDA



LUQUE T., J. ERNESTO

Evolución del mundo y la vida / J. Ernesto Luque T. – 1ª. ed. – San Juan de Pasto:
Editorial Universitaria : Universidad de Nariño, 2017.

169 p. : il.

Incluye bibliografía

ISBN: 978-958-8958-32-3

1. Vida – evolución 2. Origen – evolución 3. Evolución (Biología)

576.8 L966 - CDD- Ed. 21

Biblioteca Alberto Quijano Guerrero

EVOLUCIÓN DEL MUNDO Y LA VIDA

© Editorial Universitaria – Universidad de Nariño

Autor: J. ERNESTO LUQUE T.

ISBN: 978-958-8958-32-3

Diagramación: María Elena Mesías P.

Diseño de cubierta: Mauricio Riascos

Impresión y terminación: Centro de Publicaciones - Universidad de Nariño

Impreso y hecho en Colombia / Printed and made in Colombia

AL COMITÉ EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO que, de nuevo, me presta su apoyo para la posibilidad de publicar un libro de mi autoría.

A los profesores:

EDGAR UNIGARRO, Director del Centro de Publicaciones de la Universidad de Nariño, quien me contagio de su entusiasmo y me animó a presentar este escrito ante el Comité Editorial de la Universidad, para su evaluación y análisis, con miras a su publicación.

JESUS CABRERA por la generosidad en su apreciación de la calidad de este escrito.

WILLIAM HIDALGO por sus sugerencias y su paciencia para la cacería minuciosa de los gazapos presentes en el texto original.

Índice

Prólogo	9
1. Mito y ciencia	11
2. El Universo se agranda	17
3. Galaxias y estrellas	33
4. El rey Sol	43
5. La madre Tierra	55
6. La madre Tierra La idea de la evolución	63
7. La madre Tierra Surgimiento de la vida	71
8. Las células primitivas	85
9. Las plantas	93
10. Aparecen los animales	99
11. El Planeta de los Simios	127
12. El Futuro	161
Bibliografía	167

Prólogo

Hace ya bastantes años, cuando cursaba la carrera de Química, en la Universidad Nacional, asistí, por casualidad, a una conferencia sobre Evolución que dictaba una de los docentes de ese entonces. Creo, sin exagerar, que ha sido la disertación que mayor impacto ha tenido en mi forma de ver las cosas y de apreciar el mundo en que vivimos. De pronto, me descubrió un un nuevo mundo de conocimientos y de inquietudes.

Hasta entonces yo había aceptado, como muchos otros, lo que en mi casa me habían inculcado sobre el origen del mundo y . de las cosas que en él existen. De pronto, con esta charla, se me había abierto un nuevo mundo. Y cuando eso sucede, uno siente la necesidad de que otros también lo conozcan. Ese es el origen de este libro.

Según la Biblia, Dios creó el mundo en seis días y el proceso ocurrió, según los cálculos que el obispo irlandés Ussher realizó, también con base en los datos de la Biblia, hace unos seis mil años. Las diferencias con los datos científicos son abismales.

Los científicos creen disponer de evidencias que indican que el Universo surgió hace unos 13.800 millones de años y, desde entonces, se ha venido transformando hasta la estructura que tiene hoy. En algunos casos, los cambios han sido muy rápidos y catastróficos; en otros, lentos y continuos. Los científicos han logrado descifrar, en algunas situaciones, el cómo y el por qué de algunas de esas transformaciones.

En el libro se tocan temas de física y física cuántica, biología y microbiología y otras varias áreas del conocimiento en las cuales el autor dista de ser autoridad por lo cual debí consultar a mis colegas de esas áreas en la Universidad de Nariño y, ocasionalmente de otras universidades y profesiones. No sobra mencionar que, en muchas ocasiones, las consultas bibliográfica y personal no solo fueron de gran ayuda si no también positivamente sorprendentes e ilustrativas.

Agradezco también a los profesores WILLIAM HIDALGO y JESUS CABRERA, del Departamento de Química de la Universidad de Nariño, por sus valiosos comentarios, correcciones y sugerencias; así mismo, a todo el personal encargado de la impresión del texto, con su jefe, el profesor EDGAR UNIGARRO, a la cabeza, por el cariño y dedicación con el que realizaron su labor. Además, al Comité de Publicaciones de la Universidad de Nariño por haber aprobado la impresión del texto.

Donde la ignorancia es una bendición, es una locura ser sabio.

THOMAS GRAY (poeta inglés)

Los científicos no leen el libro de la Naturaleza; lo escriben.

CRISTIAN DE DUVE (Nobel de Fisiología y Medicina, 1974)

Las catástrofes de la historia se deben mucho más a los clérigos y los políticos que a los científicos. No es únicamente el interés lo que hace que los hombres se maten entre ellos. También lo es el dogmatismo. No hay nada tan peligroso como creer a ciegas que se está en posesión de la razón. No hay nada que cause tanta destrucción como la obsesión de una verdad considerada como absoluta. Todos los crímenes de la historia son consecuencia de algún fanatismo pero todavía no se ha perpetrado ningún genocidio para hacer triunfar una teoría científica”.

FRANCOIS JACOB (Nobel de Fisiología y Medicina, 1965)

1. Mito y ciencia

Una de las principales manifestaciones de la naturaleza humana es la curiosidad. Desde pequeños queremos saber qué fue lo que sucedió, cuándo, dónde y cómo empezó. Y para hallar una respuesta sólo hay dos posibilidades antagónicas: la religión o la ciencia.

Para la religión, la respuesta se basa en la autoridad: la verdad revelada se encuentra en los textos sagrados, cuyos contenidos solo los doctores de la iglesia están autorizados a interpretar; sus palabras son dogmas de fe y como todas las respuestas están allí, no se admiten preguntas.

Edad antigua

En las culturas antiguas (egipcia, griega, asiria, romana, judía, nórdica, hindú, azteca, maya, inca, etc.), a pesar de su diversidad geográfica, étnica e histórica, se le asignaba el principio de todas las cosas a los dioses y espíritus, figuras sobrenaturales, que los habitantes de esas culturas adoraban. Ahora estamos seguros que esos dioses nunca existieron pero sus seguidores sí.

Los griegos (Tales de Mileto, Anaximandro, Anaxímenes, Pitágoras, Filolao, Aristarco y, claro, Platón y Aristóteles) fueron los primeros en exponer a sus discípulos sus ideas sobre el Universo pero su obra no se conoció en el resto de Europa sino con posterioridad a los siglos VII y VIII cuando los musulmanes se afincaron en España, después de atravesar Mesopotamia y Egipto.

Después de conocer el pensamiento de Aristóteles, sus afirmaciones adquirieron el carácter de dogma y paralizaron el estudio de la naturaleza. Con Aristóteles se ignoró cualquier concepto matemático como número, peso, longitud, velocidad, cantidad y duración ya que la ciencia se construía a partir de nociones y no de hechos.

La edad media

La herencia dogmática de Aristóteles persistió durante toda la Edad Media –desde el siglo V hasta el XV– y se convirtió en el mayor obstáculo para el avance de la ciencia. So pena de ser torturado y/o quemado vivo, un habitante de esta etapa oscura de la humanidad, no podía apartarse un ápice de lo que decían los padres y doctores de la Iglesia, encargados de interpretar las Sagradas Escrituras y establecer, sin ninguna duda, que era lo cierto y qué no. Ser curioso y, peor, escéptico, era un gran problema. Si la Santa Inquisición lo declaraba a uno brujo o hereje era preferible no haber nacido. Discutir una afirmación de alguno de los doctores de la Iglesia podía significar ser quemado vivo. Durante este lapso fue preponderante el papel de la Iglesia Católica, en todos los aspectos de la vida.

Los reyes y los señores feudales (príncipes, condes, obispos y sus vasallos) se consagraron a la contemplación de Cristo y a esperar su segunda venida. Mientras tanto, para distraerse, inventaron guerras, quemaron brujas y torturaron a los apóstatas. A instancias del Papa, los cristianos, y en especial los jóvenes, se dedicaron a luchar por sus dogmas y matar a los infieles. Desde entonces, se han originado muchas guerras y acciones violentas debidas a los fanáticos que tratan de imponer su verdad a quienes piensan distinto. Desafortunadamente, el dogmatismo es difícil de extirpar; un ejemplo actual son algunas sectas musulmanas que tratan de exterminar por medio de las armas y el terrorismo todo lo que se aparte de su credo religioso.

Los científicos, por su parte, también defienden con ahínco lo que creen pero la suya es una lucha sin armas; es una pelea mental en el campo de las ideas, la lógica y el raciocinio. Sus teorías se deben confirmar mediante análisis profundos, experimentos programados al detalle, simulaciones en computador y nuevos descubrimientos. Puede suceder que una nueva teoría indique que la anterior estaba equivocada. Cuando esa situación se presenta, la mayoría de los científicos aceptan, con humildad, que se equivocaron. Esa postura no es una pérdida o una cobardía; es, más bien, una defensa: el convencimiento de que no ser dueño de la verdad protege contra la intransigencia.

En este libro trataremos de mostrar lo que piensan los científicos respecto a la evolución del mundo y la vida.

La edad media

En Occidente, la Edad Media, fue un período muy importante de su historia que se prolongó algo más de un milenio. Durante este lapso de tiempo, la Iglesia Católica tuvo en Europa un papel preponderante sobre todos los aspectos de la vida. So pena de ser torturado y/o quemado vivo, un habitante de esta época oscura no podía apartarse un ápice de lo que decían los padres y doctores de la Iglesia, encargados de interpretar las Sagradas Escrituras y establecer, sin ninguna duda, que era lo cierto y qué no.

Mientras tanto, para distraerse, inventaron guerras, mataron infieles en las Cruzadas, quemaron brujas y torturaron a los apóstatas. Ser curioso y, peor, escéptico era un gran problema. Si la Santa Inquisición lo declaraba a uno brujo o hereje era preferible no haber nacido.

En el mundo místico de la Edad Media, lo científico no tenía cabida. Agustín de Hipona (San Agustín), el mayor intelecto de Europa, durante más de 600 años, consideraba que el único tipo de conocimiento deseable era el conocimiento de Dios y del alma y no se alcanzaba ningún provecho investigando el reino de la naturaleza.

En lo artístico, los pintores pintaron preferencialmente a Cristo, la Virgen y los santos y los músicos compusieron música con la intención de que fuera cantada en los templos. Durante esta época, los religiosos se convirtieron en los sucesores de los filósofos de la antigüedad de tal manera que la Iglesia católica ocupó el lugar de la Academia y el Liceo.

El universo cristiano medieval tenía límites firmes en el espacio, el tiempo y el conocimiento. Así, por ejemplo, en 1650, el arzobispo norirlandés James Ussher calculó, con base en el relato literal de la Biblia, que Dios había terminado de crear el mundo el sábado 22 de octubre del año 4.004 a.d.C., en horas de la tarde. O sea que el Universo debió haber comenzado unos seis mil años atrás (más o menos al mismo tiempo que se inventaba la cerveza en Babilonia) y se extendería, en el futuro, hasta la segunda venida de Cristo. Este período es equivalente a unas doscientas a trescientas generaciones de personas. A la luz de los conocimientos actuales, esa fecha es insostenible.

El Renacimiento

Como un rechazo tímido al dominio apabullante de la Iglesia, en la segunda mitad del siglo XV, surgió en Florencia, un movimiento, el Renacimiento, que luego se extendió al resto de Europa. En sus comienzos, fue exclusivamente artístico; su preocupación primordial fue recuperar la antigüedad clásica griega y latina; sin embargo, después se amplió al ámbito científico.

El Renacimiento significó un despertar y un cambio de mentalidad; allí apareció la ciencia moderna con Galileo quien afirmó que “el libro de la naturaleza está escrito en lenguaje matemático”.

La teoría heliocéntrica

Tolomeo (100-170) astrónomo, geógrafo y matemático grecoegipcio fue el mayor divulgador de los conocimientos científicos de su época. En su obra, Composición matemática, más conocida por el nombre árabe de Almagesto, expuso su teoría geocéntrica del universo según la cual la Tierra estaba fija en el centro del Universo y la Luna, el Sol y los planetas giraban en torno suyo.

El modelo de Tolomeo fue el único aceptado y adoptado por la Iglesia Cristiana, durante más de un milenio, por considerar que esta imagen del Universo estaba de acuerdo con las Sagradas Escrituras. Además, tenía la ventaja de dejar suficiente espacio para el cielo. So pena de excomunión e, incluso, en algunos casos, de ser quemado vivo, no era posible pensar en otra posibilidad ni de salirse del relato literal de la Biblia.

Copérnico fue uno de los personajes que iniciaron la revolución científica. Este canónigo polaco, de nombre latino Nicolaus Copernicus, nació en 1473, a medio camino entre la invención de la imprenta y el descubrimiento de Colón de un mundo nuevo, más allá del mar.

El 24 de mayo de 1543, Copérnico se estaba muriendo de una hemorragia cerebral. Había alcanzado la edad de 70 años y no se sabía que hubiera hecho algo que valiera la pena. Solo había escrito un libro que estaba sin publicar: De revolutionibus orbium caelestium (De las revoluciones de los cuerpos celestes). Había retrasado la difusión de su teoría durante unos 30 años, quizás por miedo a ser tildado de hereje por su propia iglesia. El primer ejemplar completo de su libro le llegó de los impresores unas pocas horas antes de su muerte y se convirtió en uno de los libros menos vendidos de toda la historia.

En Las revolutionibus, Copérnico rebatía las ideas de Tolomeo y manifestaba que:

- No todos los cuerpos celestes se mueven alrededor del mismo centro.
- La Tierra no es el centro del Universo (teoría geocéntrica) sino solo de la órbita de la Luna y de la gravedad terrestre.
- El Sol es el centro del sistema planetario y, en consecuencia, del Universo (teoría heliocéntrica)
- Comparada con la distancia a las estrellas fijas, la distancia de la Tierra al Sol es enormemente pequeña.
- El cambio diario aparente del firmamento se debe a la rotación de la Tierra sobre su propio eje.
- El movimiento anual aparente del Sol se debe a que la Tierra, como los demás planetas, gira en torno del Sol.

La idea heliocéntrica del Universo alteró el clima del pensamiento no por lo que afirmaba sino por lo que implicaba. Era una idea destructiva para el sólido edificio de la filosofía medieval. El universo copernicano no solo se expandía hacia el infinito sino que al mismo tiempo era descentralizado, desconcertante y anárquico. No poseía ningún centro natural de orientación. Las direcciones “arriba” y “abajo” ya no tenían sentido; no había ninguna dirección absoluta con lo cual desaparecía la tranquila sensación de estabilidad, inmovilidad y orden. ¿Podría haber creado Dios una colosal multitud de estrellas en beneficio de una sola?.

Galileo Galilei (1564-1642), calificado como el padre de la astronomía, la física y la ciencia modernas, mejoró el telescopio y con él se dedicó a observar el cielo nocturno. Vio manchas en el Sol y cráteres y arrugas en la superficie de los planetas lo cual indicaba que los cuerpos celestes no eran perfectos ni inmutables como afirmaba Aristóteles. Cuando Galileo enfocó su telescopio sobre el planeta Júpiter encontró que éste estaba acompañado por varios pequeños satélites o lunas que giraban a su alrededor. Esta observación indicaba que no todo tenía que girar alrededor de la Tierra lo cual confirmaba que la teoría geocéntrica no era cierta. Por otro lado, a pesar de que su telescopio proporcionaba un aumento muy modesto, Galileo comprobó que lo que los griegos llamaban galaxia (del griego, lácteo) estaba formada por miles de estrellas (actualmente millones), poco brillantes para ser distinguidas a simple vista.

Galileo fue un férreo defensor del heliocentrismo lo cual le provocó serios disgustos con la iglesia y, en especial, con los jesuitas. Después de un juicio que le siguió el tribunal de la Inquisición, Galileo fue obligado a retractarse so pena de ser condenado a la hoguera. Aquí, es bueno recordar que Giordano Bruno, contemporáneo de Galileo, fue torturado y quemado vivo en la Plaza de Las Flores, en Roma, por afirmar que las estrellas eran semejantes al Sol, aunque mucho más lejanas.

En el caso de Galileo, sus aseveraciones contradecían los escritos del Antiguo Testamento, que afirmaban que Josué había mandado parar el Sol. (Galileo fue absuelto por el Papa Juan Pablo II, en 1991). Se cuenta que Galileo pronunció la famosa frase, refiriéndose a la Tierra: “Eppur si muove” (y sin embargo, se mueve) y sentó un principio: “el libro de la naturaleza está escrito en lenguaje matemático”. Su condena fue conmutada por la prisión perpetua y marcó, quizás para siempre, la diferencia infranqueable entre la ciencia y la religión.

Para conmemorar el cuarto centenario de los logros de Galileo, la Asamblea General de las Naciones Unidas proclamó al año 2009 como Año Internacional de la Astronomía.

Kepler. Varios años después de la muerte de Copérnico, Johannes Kepler, un astrónomo alemán, se dio cuenta que los planetas describían elipses y no circunferencias en sus movimientos alrededor del Sol.

Kepler llegó al convencimiento de que una fuerza que emana del Sol es la que hace posible que los planetas se mantengan en sus órbitas. Los planetas exteriores se mueven más lentamente debido a que esa fuerza conductora les llega disminuida en proporción a su distancia. Por primera vez se hacía un intento no sólo de describir los movimientos celestes en términos geométricos sino de asignarles una causa física.

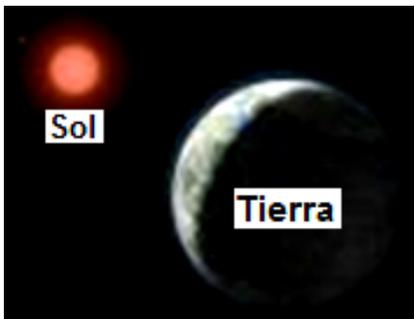
En su libro *Mysterium*, Kepler reconoció que el sistema postulado por Copérnico era correcto. En el mismo libro formuló las dos primeras de sus tres leyes del movimiento planetario. La primera ley dice que los planetas se mueven alrededor del Sol, no en círculos sino en órbitas elípticas, uno de cuyos focos lo ocupa el Sol. La segunda ley expresa que los planetas no se desplazan por sus órbitas con un movimiento uniforme sino que su velocidad aumenta a medida que se acercan al Sol. Estas fueron las primeras “leyes científicas” en el sentido moderno: afirmaciones precisas y verificables, expresadas en términos matemáticos.

Isaac Newton quien nació en 1642, el mismo año de la muerte de Galileo, demostró que el sistema descrito por Copérnico y Kepler no solo coincidía con la realidad, sino que, además, era el único posible.

2. El Universo se agranda

¿Por qué el cielo es oscuro de noche?

En 1826, el filósofo y astrónomo alemán, Heinrich Olbers, se sentó una noche frente a su casa y se planteó una interesante pregunta: ¿por qué el cielo es oscuro de noche?



En la parte de la Tierra que está alumbrada por el Sol es de día; en la parte donde, en ese momento, no alumbra el Sol, es de noche.

La respuesta, aparentemente, es simple: en la porción de la Tierra iluminada por el Sol es de día; en la parte contraria, a la cual no le llegan los rayos del Sol, es de noche. Sin embargo, Olbers pensó que el Sol es una estrella como todas las otras de modo que las demás estrellas también debían contribuir con algo de luz y de calor; la contribución debía ser pequeña porque esas estrellas se encuentran muy lejos de nosotros; sin embargo, si se considera que desde siempre ha habido un número muy grande de estrellas distribuidas por todo el espacio y en todas las direcciones, el efecto acumulado de todas las estrellas, después de algún tiempo sería muy intenso, por lo cual no debería haber partes oscuras en el cielo nocturno: todas las partes del cielo deberían brillar con una luminosidad semejante a la que se presenta en la superficie del Sol. A no ser que... las estrellas no hayan existido siempre si no que se encendieron en algún momento en el pasado y no estén quietas si no alejándose de nosotros. Si las cosas son así, la luz y el calor no se pueden concentrar en un solo sitio, sino que, por el contrario, se deben distribuir en un espacio cada vez mayor.

Durante casi un siglo nadie se preocupó de buscar una respuesta a la inquietud de por qué las estrellas se alejan unas de otras. Hasta comienzos del siglo XX se consideró que el Universo era bastante simple, tranquilo, eterno, incambiable y consistente de una sola galaxia, la Vía Láctea, que contenía unos pocos millones de estrellas visibles.

Edwin Hubble

En 1920 se puso en funcionamiento el mayor instrumento científico del mundo de ese entonces, el telescopio de 254 cm de diámetro, instalado en el monte Wilson, en California, USA. Gracias a ese telescopio y al perfeccionamiento de las técnicas fotográficas, el astrónomo norteamericano Edwin Hubble modificó el conocimiento del Universo como nadie más lo ha hecho hasta ahora. Hubble pudo observar la galaxia -a partir de entonces, el antiguo nombre de nebulosa se cambió por el de galaxia- de Andrómeda con un detalle nunca conseguido hasta entonces y comprobó que estaba formada por muchas estrellas. Según sus cálculos, se encontraba a 750.000 años luz; sin embargo, en 1952 se determinó que la distancia de la Tierra a Andrómeda es en realidad, de unos dos millones y medio de años-luz lo cual quiere decir que en la Tierra percibimos un rayo de luz que se emitió en Andrómeda hace más de dos millones de años. Con anterioridad se había determinado que el diámetro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, es de unos 100.000 años-luz; Andrómeda se encontraba mucho más allá; por tanto, se trataba de otra galaxia. Fue la primera galaxia diferente a la nuestra que se detectó en el espacio. Después se hallaron muchas más. Este hallazgo amplió el Universo conocido unas 100 billones de veces.

Hubble también encontró que las galaxias se están separando unas de otras de una forma regular, descrita por una relación matemática que ahora se conoce como ley de Hubble, según la cual las galaxias entre más lejos estén, más rápido se alejan. Así, si una galaxia se aleja de nosotros a 1.000 kilómetros por segundo, la que se encuentra a doble distancia de la anterior se alejará a 2.000 Km/seg y otra que se encuentre a mayor distancia se alejará a mayor velocidad.

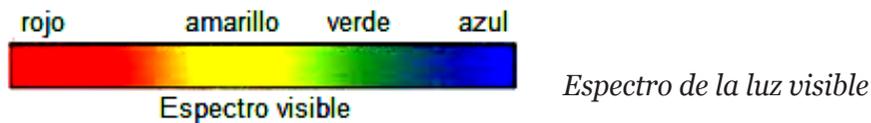
Mirando las estrellas

Las estrellas se encuentran a distancias enormes. Nuestra estrella, el Sol, se encuentra a unos 150 millones de kilómetros de nosotros y la luz que emite tarda unos ocho minutos en llegar a la Tierra. La siguiente estrella más cercana a nosotros es α -Centauro que se encuentra “solo” a unos 4.5 años-luz (la luz proveniente de α -Centauro tarda cuatro años y medio en llegar a la Tierra). Esto equivale a unos 42 billones de kilómetros. Ni aun viajando durante todo el transcurso de nuestra

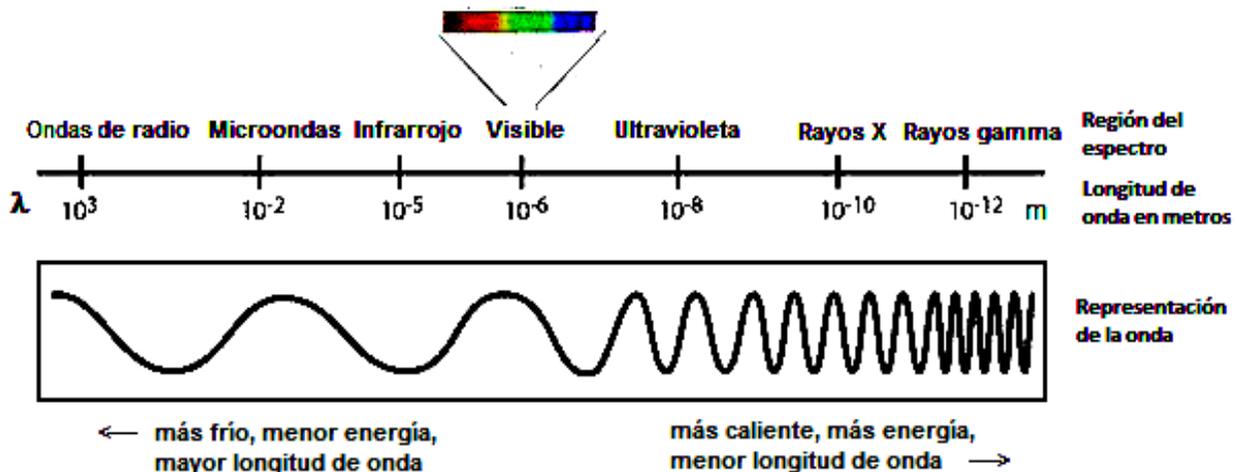
vida, a la máxima velocidad que puede alcanzar un cohete en la actualidad, podríamos llegar a α -Centaurus. La única posibilidad, entonces, de obtener alguna información de una estrella es mediante el análisis de la luz que esa estrella emite y que podemos detectar en la Tierra.

Análisis de la luz

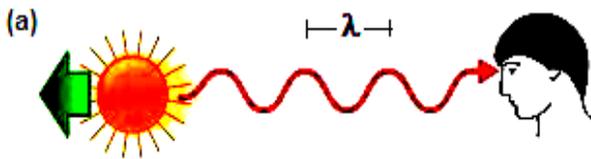
Isaac Newton descubrió, hace unos 400 años, que cuando la luz del Sol atraviesa un prisma (un trozo de vidrio o de cuarzo triangular), la luz se divide –al igual que ocurre en el arco iris- en los colores que la componen. Esto se conoce como el espectro de la luz visible.



Se puede tener idea de la temperatura a la que se encuentra un cuerpo de acuerdo al color o el tipo de radiación. Es lo que sucede con un soplete de soldadura: a medida que la llama se calienta va pasando del color rojo al amarillo y finalmente cuando ya está muy caliente adquiere el color azul. Pero si seguimos calentando ya no es el color lo que cambia sino el tipo de radiación: ultravioleta, rayos X y rayos gamma. El conjunto de radiaciones forma el espectro electromagnético:

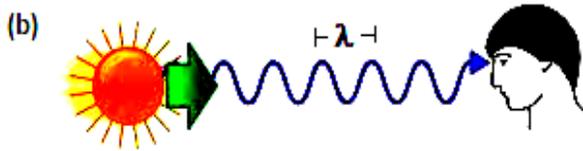


Espectro electromagnético



El objeto (una galaxia, por ejemplo) se aleja: la longitud de onda λ se alarga: se corre hacia el rojo para el observador

Variación de la longitud de onda (λ) cuando (a) un cuerpo luminoso se aleja o (b) se acerca a nosotros.



La galaxia se acerca; λ se hace más corta y el observador ve la luz corrida hacia el violeta

Si enfocamos un telescopio hacia una galaxia (o una estrella) lo único que podemos ver es la luz proveniente de esa galaxia. Si esa luz cambia de color es porque la galaxia se está acercando o se está alejando de nosotros. Si la luz se encuentra corrida hacia el lado rojo del espectro es un indicativo de que la galaxia se aleja de nosotros; por el contrario, si la luz que observamos se encuentra corrida hacia el lado violeta del espectro es un indicativo de que la galaxia se acerca.

Hubble encontró que no importaba hacia qué lugar apuntara su telescopio, la luz proveniente de las galaxias y las estrellas se desplazaba hacia el rojo lo cual indica que esos astros se están alejando de la Tierra. Pero las galaxias difícilmente se mueven a través del espacio. Ellas emiten luz, con la misma longitud de onda, en todas las direcciones. Este fenómeno se puede explicar si imaginamos un globo esférico. La longitud de onda se alarga durante el viaje no porque la galaxia se esté alejando sino porque el espacio se está expandiendo 5).



Supongamos que tenemos unos globos con unos puntos blancos pintados sobre su superficie. Al inflar el globo los puntos no se mueven pero la separación entre ellos aumenta. No hay un punto, sobre la superficie del globo que se pueda considerar el centro de la expansión. Cualquiera que sea el punto que designemos como centro, todos los demás puntos se van alejando del mismo, uniformemente, en todas las direcciones.

Hubble encontró, entonces, que todas las galaxias se están alejando de nosotros; las galaxias no cambian su tamaño pero la distancia entre ellas si se incrementa continuamente. De modo que si retrocedemos mentalmente en el tiempo o “pasamos la película al revés”, las galaxias se irán acercando cada vez más entre sí y el Universo se irá haciendo cada vez más pequeño, hasta llegar a un momento, en el remoto pasado, en el cual todas las galaxias debieron estar juntas en un punto infinitamente denso. Pero la expansión no pudo haber durado desde siempre porque las galaxias en la actualidad estarían extremadamente dispersas por lo cual es posible concluir que el Universo no ha existido siempre, sino que surgió en algún momento en un pasado remoto.

La cantidad de luz que se ha corrido hacia el rojo proporciona información acerca de cuánto ha crecido el Universo en ese lapso y cuánto hace que comenzó el proceso. O, en otras palabras, qué tan antiguo es el Universo. Entre más corrida esté la luz hacia el lado rojo del espectro, mayor es el tiempo transcurrido. Pero la luz de los primeros tiempos está tan fuertemente corrida hacia el rojo que los astrónomos deben mirar más allá del rojo, en el infrarrojo y en las ondas de radio (ver Espectro electromagnético).

La radiación cósmica de fondo

Hace medio siglo, los científicos anunciaron el descubrimiento de la evidencia definitiva de la expansión del Universo: es lo que se conoce como la radiación cósmica de microondas de fondo que consiste en fotones producidos en los primeros instantes del Big Bang. Estos fotones dispersaron los protones y los electrones hasta que todo se enfrió lo suficiente para que los protones atrajeran de nuevo electrones y se formaran átomos de hidrógeno. Los átomos, eléctricamente neutros, son menos propensos a esparcir fotones, en línea recta, a través del espacio.

Un fotón emitido por un átomo tiende a golpear el electrón de otro átomo.

La mínima temperatura que se puede alcanzar en el Universo es -273.16 grados centígrados. Este valor se conoce como el cero absoluto. Todos los cuerpos con una temperatura superior al cero absoluto emiten radiación electromagnética: una piedra, el suelo de la Tierra o cualquier organismo emiten radiación. Las personas, cuya temperatura promedio es de 37 °C, emiten radiación infrarroja (la base de los lentes de visión nocturna es precisamente un detector de radiación infrarroja). Un cuerpo con menor temperatura emite microondas. Por el contrario, entre mayor sea la temperatura, más energética es la radiación y de mayor frecuencia.

Grados kelvin (°K): En ciencia se utiliza mucho la escala Kelvin o escala absoluta de temperatura. Se debe a William Thomson (nombrado Lord Kelvin, en 1892) quien estableció que la mínima temperatura que puede alcanzar cualquier cuerpo, en el Universo, es de -273.16 °C. Este valor se conoce como el cero absoluto y equivale a cero grados Kelvin (0 °K).

Cuando los fotones atraviesan el espacio en expansión, pierden energía y su temperatura decrece. De la misma manera, el Universo se enfría cuando se expande, al igual que sucede con el aire comprimido, en un tanque a presión.

La radiación cósmica de fondo (CMB, por sus siglas en inglés) tiene una temperatura de solo tres grados kelvin (-270 °C) mientras que el proceso que liberó la radiación debió ocurrir a una temperatura mucho mayor. Observando el gas, en galaxias distantes, los astrónomos han medido directamente la temperatura de la radiación en el pasado distante. Esas medidas confirman que el Universo se ha estado enfriando con el tiempo o, lo que es equivalente se ha estado expandiendo. La expansión del espacio no afecta el tamaño de objetos materiales como las galaxias, estrellas u otros objetos que se mantienen cohesionados por algún tipo de fuerza.

El descubrimiento de la radiación cósmica de fondo

A principios de la década de 1960 se lanzaron los primeros satélites de comunicaciones. Los de la serie Eco eran globos enormes que se hinchaban automáticamente en órbita terrestre. Estaban cubiertos con una película de material metálico para reflejar ondas de radio. Las señales lanzadas desde la Tierra rebotaban en los satélites y una señal muy débil regresaba a la Tierra y podía detectarse mediante una antena, en forma de trompeta gigante, de más de seis metros de longitud). Los encargados de manejar esta antena eran dos expertos electrónicos americanos, A. Penzias y R. Wilson que trabajaban para la compañía Bell Telephone. Ellos encontraron que había un nivel de “ruido” (ruido se entiende aquí como una señal no deseada tal como el sonido confuso producido por un radio mal sintonizado o la “nieve” de una pantalla de televisión) inexplicablemente alto en las lecturas de la antena. Dedicaron una gran cantidad de tiempo para tratar de liberarse de este ruido que ellos creían se debía a algún defecto de la antena. Inclusive, pensaron que podría ser consecuencia del “recuerdo excremental” que dejó una pareja de palomas que fijó su residencia en la punta de la antena. Sin embargo, después de limpiar la antena, la señal inesperada persistía. El mismo ruido no cambiaba durante el día o la noche y permanecía a lo largo de todo el año. Dado que la Tierra gira sobre su eje y alrededor del Sol y, por consiguiente, la antena apuntaba constantemente hacia diferentes partes del cielo, Penzias y Wilson llegaron a la conclusión de que el ruido no se debía a la antena sino que provenía de

todas las direcciones del cielo y era el mismo Universo el que lo producía. El ruido descubierto por Penzias y Wilson era equivalente a una radiación de tres grados por encima del cero absoluto (- 270 °C). Si la radiación era la misma en todas las direcciones, el Universo también debía ser esencialmente el mismo en todas las direcciones.

Simultáneamente, dos físicos norteamericanos de la Universidad de Princeton, B. Dicke y J. Peebles, estaban ocupados diseñando un receptor de radio para buscar precisamente esa radiación de fondo. Ellos consideraban que si el Universo, en sus primeros instantes, había sido muy caliente y denso, como lo propone el modelo del Big Bang, aún deberíamos ser capaces de ver el resplandor de los inicios del Universo porque la luz proveniente de lugares muy distintos y lejanos nos estaría alcanzando ahora en forma de radiación de microondas como residuo de la luz proveniente de un pasado remoto del Universo, cuando éste era un objeto muy denso y caliente. Penzias y Wilson se enteraron del objetivo de este trabajo y comprendieron que ellos habían encontrado esa radiación cósmica de fondo. Por su descubrimiento recibieron el premio Nobel de Física en 1978.

La singularidad

En 1922, el matemático ruso, Alexander Friedman, resolvió de dos formas distintas las ecuaciones de Einstein. Dichas soluciones indicaban que en el pasado existió un período extraordinario en el que toda la materia del Universo estuvo concentrada en un solo punto, muchísimo más pequeño que la cabeza de un alfiler. Ese punto se conoce como “singularidad”. Actualmente se sabe que las estrellas al contraerse sobre sí mismas, debido a su propio peso, pueden finalmente producir un agujero negro, en cuyo centro se encuentra la problemática singularidad. Aquí, los conceptos normales de espacio y tiempo se diluyen.

Roger Penrose, físico y matemático británico, demostró que en la singularidad, el espacio y el tiempo desaparecen de manera real, no metafórica. Hawking y Penrose, en 1965, consideraron que el Universo pudo sufrir el proceso inverso, es decir, que comenzó de una singularidad de densidad infinita.

En 2001 se lanzó al espacio la sonda WMAP de microondas, a una distancia suficientemente lejana de la Tierra (1.5 millones de kilómetros) para asegurar que no hubiera interferencias. Mediante mediciones espectroscópicas muy precisas, esa sonda logró determinar que **la edad del Universo es de 13.800 millones de años** y que las estrellas comenzaron a formarse cuando el Universo tenía tan solo 200 millones de años. Encontró, además, que el Universo

que vemos, compuesto de átomos, corresponde solo a un 4.5 por ciento y el resto –un 95 por ciento- a dos entidades de naturaleza desconocida a las que los científicos han denominado materia oscura y energía oscura.

El Big Bang

En 1946, George Gamow desarrolló la teoría del **Big Bang** (Gran Explosión). Según sus cálculos, en el estado inicial del Universo, la materia comprimida debió tener una temperatura extremadamente alta lo cual provocó su explosión. Como producto de esa explosión inicial se formó el Hidrógeno, el elemento más ligero y el más abundante en el Universo (un 75 por ciento del total). A partir del Hidrógeno se formaron los demás elementos, en los primeros minutos después de la explosión.

El Big Bang constituye el momento en que de la “nada” emergió el Universo. La materia era, hasta ese momento, un punto de densidad infinita, “explotó” generando la expansión de la materia, el tiempo y el espacio en todas las direcciones. No fue una explosión en el espacio; fue una explosión del espacio, sin que hubiera un centro a partir del cual ocurriera la explosión.

No pudo haber ningún acontecimiento anterior al Big Bang (un tiempo antes del tiempo) y si lo hubo, no pudo afectar de ninguna manera a lo que ocurre en el presente.

¿Cómo se ha podido retroceder tanto?

La visión del origen del Universo es cada vez más rica y compleja. ¿Cómo se ha podido retroceder hasta casi los instantes mismos de la creación?

El conocimiento de que disponemos en la actualidad procede de varias fuentes: la construcción de modelos teóricos, las simulaciones por computador, el uso de telescopios muy potentes, la búsqueda de vestigios cosmológicos y los experimentos con colisionadores, como el Gran Colisionador de Hadrones, LHC (figura 2.6). De esta forma, los científicos han podido retroceder cada vez más en la historia del Universo hasta llegar al primer microsegundo y luego a los 10^{-34} segundos (una fracción de segundo inimaginablemente pequeña), con teorías consistentes pero con evidencias escasas. Y finalmente, los primeros instantes, para los cuales las ideas son pura especulación. Pero es claro que el Universo ha sufrido una evolución desde la sopa de las partículas elementales iniciales hasta la complejidad que observamos hoy de galaxias, estrellas, planetas y vida.

Con el LHC se logró acelerar protones en direcciones opuestas -hasta una velocidad muy cercana a la de la luz- y hacerlos chocar. La colisión generó un calor extremadamente alto y un tremendo estallido de materia y energía que simula los primeros microsegundos después del Big Bang.



El Gran colisionador de hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) es el mayor instrumento construido por el hombre. Se encuentra a 100 metros de profundidad, entre Suiza y Francia, bajo la ciudad de Ginebra y tiene una circunferencia de 27 kilómetros. En su construcción intervinieron laboratorios, universidades y miles de científicos de todo el mundo.

El universo inflacionario

En 1981 el físico estadounidense Alan Guth propuso la teoría del **universo inflacionario** o estallido de la expansión cósmica.

Según Guth, todo lo que conocemos y que llamamos Universo, ocupaba un espacio muchísimo más pequeño que la cabeza de un alfiler y tras la explosión del Big Bang, en un tiempo muy corto, 10^{-43} segundos, -una fracción inimaginablemente pequeña de segundo- el Universo se expandió, en forma exponencial, para plantar las semillas de lo que serían las estrellas, los planetas, las galaxias y las vastas extensiones de espacio casi vacío. Este estallido debe explicar propiedades básicas del cosmos tales como su uniformidad general y los grumos que constituyeron las semillas para las galaxias y otras estructuras del Universo. Las observaciones de CMB coinciden con esta predicción, suministrando la evidencia más fuerte de que la inflación o algo muy similar ocurrió en la historia muy temprana del Universo.

Las partículas subatómicas

Aristóteles creía que la materia era continua: un pedazo de materia se podía dividir sin límite en partes cada vez más pequeñas; nunca se tropezaba uno con un grano de materia que no se pudiera seguir dividiendo. Aristóteles también consideraba que toda la materia del Universo

estaba compuesta por cuatro elementos básicos: tierra, aire, fuego y agua. Con el progreso de la química se puso de presente que la gran variedad y forma de la materia exigía la existencia de muchos más elementos que se combinaran de manera diversa para construir las moléculas. Durante los siglos XIX y XX, los científicos establecieron que, en la naturaleza, se encuentran 92 elementos diferentes y billones y billones de moléculas distintas. Esos elementos son los constituyentes de las piedras y los minerales, de los gases del aire y de las sustancias disueltas en los mares, de las células de plantas y animales, de las estrellas y galaxias y, en fin, de todo nuestro mundo.

Por el contrario, otro sabio griego, Demócrito, sostenía que la materia era granular y todas las cosas estaban constituidas por un gran número de diversos tipos diferentes de átomos (átomo significa indivisible, en griego). Una barra de oro se podía dividir en varias barras de oro y éstas en otras y seguir así hasta llegar al átomo. Esto era lo más pequeño y ya no se podía dividir más. Pero también Demócrito se equivocó. Hay estructuras más pequeñas que el átomo.

Los griegos también se habían dado cuenta que la materia se puede cargar eléctricamente. Cuando se frotaba ámbar (*elektron*, en griego) o sea goma de pino fosilizada, esta sustancia adquiría una propiedad nueva: atraía cabellos y otros objetos pequeños (posteriormente, las partículas cargadas negativamente y presentes en toda la materia se denominaron **electrones**).

Entre finales del siglo XIX y comienzos del XX, el físico neozelandés **Rutherford** (recibió el premio Nobel de Física en 1906), probó que la mayoría de la masa del átomo residía en un cuerpo compacto situado en su centro, llamado **núcleo** que contenía las partículas pesadas, cargadas positivamente y, conocidas como **protones**. Lo que diferencia a un elemento químico de otro es el número de protones presente en su núcleo. Así, por ejemplo, en un átomo de oxígeno hay 8 protones en el núcleo y en el núcleo de un átomo de hierro se encuentran 26 protones.

En 1909, el mismo Rutherford propuso que en el núcleo existía otra partícula con una masa similar al protón pero sin carga (neutra) a la cual denominó **neutrón**. Su conjetura fue confirmada unos 30 años después.

Resultó, entonces, que el átomo no era compacto, como se había pensado sino que está constituido por partículas todavía más pequeñas.

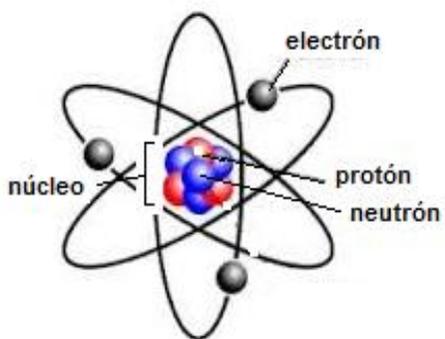
Hoy se sabe que el tamaño de un átomo típico es alrededor de una cien millonésima de centímetro (10^{-8} cm) con un núcleo, constituido por protones y neutrones, que es entre 10.000 y 100.000 veces menor que el átomo. A gran distancia del núcleo giran los electrones, con una velocidad enorme. Si suponemos que el núcleo es igual a un balón de fútbol que se encuentra en el centro de un estadio, el átomo completo abarcaría hasta las afueras del estadio. Es decir, la

mayor parte del espacio ocupado por el átomo está vacío mientras que en el pequeño volumen ocupado por el núcleo se concentra más del 99.9 por ciento de la masa total, con lo cual éste alcanza una densidad cercana a 300 millones de toneladas por centímetro cúbico (3×10^{17} veces superior a la del agua).

Los quarks

Se supuso, entonces, que no podía haber algo más pequeño que los protones y neutrones. Pero los científicos son aguafiestas: encontraron que protones y neutrones están constituidos, a su vez, por partículas más pequeñas: los **quarks**; cada uno, tiene tres quarks.

Los experimentos con los aceleradores de partículas (tales como el Gran Colisionador de Hadrones) que recrean hoy y aquí en la Tierra, lo que debieron ser las condiciones primitivas del Universo, nos aseguran que la sopa de quarks existió, aunque para explorar esta época, los cosmólogos no se apoyan tanto en telescopios más grandes y potentes sino en poderosas ideas de la física de partículas. Luego, a medida que el Universo se expandió y se enfrió, se desarrollaron estructuras por capas: neutrones y protones, núcleos atómicos, átomos, estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias y finalmente, supercúmulos.

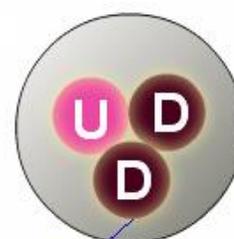


Estructura de un átomo. El núcleo, constituido por protones y neutrones, tiene carga positiva, y concentra más del 99,9% de la masa total del átomo. La cantidad de protones en el núcleo (número atómico), determina el elemento químico al que pertenece el átomo.

La física de partículas afirma que los quarks, junto con los leptones, son las partículas fundamentales constituyentes de la materia. Los quarks son de dos clases: U (de Up: arriba, en inglés y D (de Down: abajo). Varias especies de quarks se combinan de manera específica para formar partículas subatómicas tales como protones y neutrones, presentes en el núcleo de los átomos.



Protón



Neutrón

Gracias a los colisionadores de partículas y al desarrollo de nuevas teorías, se han descubierto más partículas subatómicas (positrones, fotones, gluones, mesones, bariones, bosones, neutrinos y un largo etcétera hasta completar unas 90 partículas hoy en día). La última fue anunciada en julio de 2012, como “una partícula consistente con el bosón de Higgs”. Su nombre se debe al físico que la postuló teóricamente y que, por ello, recibió el premio Nobel.

La materia oscura

Ahora parece que la fase inicial de la sopa de quarks fue el lugar de nacimiento de la materia oscura. Aunque la identidad de la materia oscura no parece clara, su existencia si está muy bien establecida. Cualquier cosa que ella sea debe interactuar débilmente con la materia ordinaria. Los intentos para encontrar un armazón que unifique las fuerzas y las partículas de la naturaleza ha llevado a predecir la existencia de partículas estables o de larga vida que deben constituir la materia oscura. Estas partículas deben estar presentes hoy como remanentes de la fase de sopa de quarks y se predice que deben interactuar muy débilmente con los átomos.

La fase de sopa inicial de quarks probablemente guarde el secreto de por qué en la actualidad, en el Universo hay más materia que antimateria. Los físicos piensan que originalmente el Universo tenía igual cantidad de cada una pero en algún punto se desarrolló un ligero exceso de materia, un quark extra por cada billón de antiquarks. Este desbalance aseguró que suficientes quarks sobrevivieran a la aniquilación con los antiquarks cuando el Universo se expandió y se enfrió. Hace más de cuarenta años, los experimentos en un acelerador, revelaron que las leyes de la física están parcialmente a favor de la materia y esta ligera inclinación permitió la creación del exceso de quarks.

La sopa de quarks surgió en un tiempo extremadamente corto, quizás 10^{-34} segundos después del Big Bang, en un estallido de la expansión cósmica conocido como **inflación**. Este estallido debe explicar propiedades básicas del cosmos tales como su uniformidad general y los grumos que constituyeron las semillas para las galaxias y otras estructuras del Universo. El modelo visto en el cielo CMB es una imagen gigante del mundo subatómico. Las observaciones de CMB coinciden con esta predicción, suministrando la evidencia más fuerte de que la inflación o algo muy similar ocurrió en la historia muy temprana del Universo.

Teoría de cuerdas

La teoría de cuerdas es un modelo fundamental de física teórica que básicamente asume que las partículas materiales, aparentemente puntuales, son en realidad “estados vibracionales” de un objeto extendido más básico llamado “cuerda” o filamento.

De acuerdo con esta propuesta, un electrón no es un “punto” sin estructura interna y de dimensión cero, sino un amasijo de cuerdas minúsculas que vibran en un espacio-tiempo de más de cuatro dimensiones. Un punto no puede hacer nada más que moverse en un espacio tridimensional. De acuerdo con esta teoría, a nivel “microscópico” se percibiría que el electrón no es en realidad un punto, sino una cuerda en forma de lazo. Una cuerda puede hacer algo además de moverse; puede oscilar de diferentes maneras. Si oscila de cierta manera, entonces, macroscópicamente veríamos un electrón; pero si oscila de otra manera, entonces veríamos un fotón, o un quark, o cualquier otra partícula del modelo estándar.

Multiverso

El matrimonio de la teoría de cuerdas con el concepto de inflación ha llevado a una idea más audaz, la de un multiverso que comprende un número infinito de piezas desconectadas, cada una con sus propias leyes físicas.

El concepto de multiverso, el cual todavía está en su infancia, lleva a dos hechos teóricos claves; primero, si la inflación ocurrió una vez pudo haber sucedido muchas veces, con un infinito número de regiones inflacionarias creadas a través del tiempo. Nada puede viajar entre estas regiones de modo que no se afecten una a otra. Segundo, la teoría de cuerdas sugiere que estas regiones tienen parámetros físicos diferentes tales como el número de dimensiones espaciales y la clase de partículas estables.

La idea del multiverso suministra respuestas novedosas a las más grandes preguntas de la ciencia: qué sucedió antes del Big Bang y por qué las leyes de la física son como son. El multiverso propone que hubo infinito número de comienzos de Big Bang, cada uno con su propia explosión de inflación. Dentro de la infinidad de Universos, todas las leyes de la física son posibles.

Energía oscura.

Aparentemente, algunas galaxias no cumplen la ley de Hubble. Así, por ejemplo, Andrómeda, la galaxia vecina más cercana a nosotros se dirige hacia la Vía Láctea (nuestra galaxia) en lugar

de alejarse de ella (se calcula que en unos 5.000 millones de años las dos galaxias colisionaran). Se debe aclarar, entonces, que la ley de Hubble describe el comportamiento promedio de las galaxias pero éstas pueden tener también comportamientos locales en donde se manifieste la atracción gravitacional como ocurre entre la Vía Láctea y Andrómeda.

Dado que, en la naturaleza, todas las partículas tienen su contraria no es aventurado pensar que con la energía ocurra lo mismo. Ya Einstein, mediante su famosa ecuación $E = mc^2$ había establecido una equivalencia entre la masa y la energía, de tal manera que el comportamiento puede ser similar. Se supone, por ejemplo, que la energía oscura, recientemente descubierta, tiene un efecto contrario a la gravitación.

Por otro lado, Einstein predijo que el tiempo y el espacio se deforman en cercanías de un agujero negro. Si se dispone de un reloj, éste va andando cada vez más despacio a medida que se acerca a algo tan denso como un agujero negro, hasta que se detiene (se detiene el tiempo, no el reloj). Si se acepta que el Big Bang se produjo por la explosión de un superátomo infinitamente denso, allí el tiempo no corría o, en otras palabras, no existía y, por lo tanto, tampoco existía ningún evento anterior al Big Bang.

Como ya lo mencionamos, el Universo se encuentra en expansión desde el Big Bang. Pero las galaxias ejercen una fuerza de gravedad entre ellas mismas que tiende a acercarlas entre sí, y por lo tanto a frenar la expansión del Universo. Hasta la década de 1990 existía la duda sobre si esa fuerza era suficiente para frenar la expansión (y eventualmente volver a comprimirlo todo, como un Big Bang inverso), o si por el contrario era insuficiente, en cuyo caso lo único que se lograría sería disminuir la velocidad de la expansión. Sin embargo, otro hallazgo de la sonda WMAP, tal vez el más sorprendente, es que el Universo se expande cada vez a mayor velocidad lo cual implicaría que puede existir una especie de gravedad negativa que, en lugar de ser atractiva, sea repulsiva. A la energía que produce esta expansión, absolutamente incomprendida, la denominaron **energía oscura**.

Ondas gravitacionales

La luz tiene sus límites ya que no puede mostrar el Universo entero. Así, nunca se podrá ver el centro de un agujero negro o el comienzo del tiempo mismo. Durante los primeros cientos de miles de años después del Big Bang, los fotones del universo inicial quedaron atrapados en

una sopa densa de partículas que ocultaron la luz. No fue hasta después de 380.000 años que el Universo se enfrió y llegó a ser transparente. Por tanto, mediante la luz no se puede observar más atrás. Si se quiere conocer lo que sucedió antes de ese tiempo o conocer algo más de lo que está oculto en el interior de los agujeros negros, es necesario detectar las ondas gravitacionales producidas por la fuerza de la gravedad y predichas por Einstein. Según los cálculos, esas ondas son por lo menos un millón de veces más pequeñas que un átomo pero la inflación que ocurrió en la primera fracción de segundo, después del Big Bang, pudo amplificar la onda gravitacional primordial lo suficiente para ser detectada. Científicos, del Centro Astrofísico de la Universidad de Harvard, parecen haber descubierto esas ondas gravitacionales mediante un telescopio situado en el Polo Sur –el lugar más seco de la Tierra- denominado Biceps2. Esto representaría la unificación de la teoría de la Relatividad y la Física cuántica, las dos teorías que reinaron en forma independiente durante el siglo XX con lo cual será posible direccionar el estudio hacia la etapa previa al tiempo de Planck, 10^{-43} segundos, cuando el espacio-tiempo adquirió su forma.

Los átomos

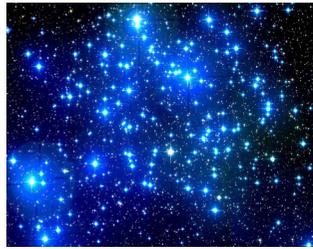
En el primer segundo de la edad del Universo solo existían los protones y neutrones. El Universo inicial debió ser extremadamente denso y extremadamente caliente. Antes de 100.000 años, la densidad de la energía de radiación debió exceder a la de la materia. Este tiempo marca, entonces, el comienzo del ensamblaje gravitacional de todas las estructuras que vemos en el Universo en la actualidad. Primero aparecieron los núcleos; hasta los 380.000 años, el Universo era una sopa más o menos uniforme de núcleos atómicos, electrones y fotones. Cuando la temperatura bajó a unos 3.000 grados kelvin, los núcleos y los electrones se unieron para formar átomos pero solo se produjeron los elementos más ligeros de la Tabla Periódica: helio (un 25 por ciento, en masa, de los átomos del Universo) y pequeñas cantidades de litio y los isótopos deuterio y helio 3. El resto del plasma (un 75 por ciento) se estableció en forma de protones que eventualmente se convirtieron en átomos de hidrógeno. Los demás elementos de la Tabla Periódica se formaron en las estrellas y en las explosiones estelares.

Cien años después de que el universo comenzó había solo unos pocos elementos, principalmente hidrógeno y helio y leves trazas de litio y berilio, dentro de la mayor oscuridad. Después de 100 millones de años la oscuridad terminó cuando las nubes de hidrógeno colapsaron y se incendiaron. En los hornos de fundición de las primeras estrellas, los átomos se aplastaron, se quemaron y se convirtieron en átomos más complejos, como el carbono, por ejemplo.

Resumen de la historia del Universo:



Big Bang
Inicio del Universo hace
13.800 millones de años
(1 de enero)



Primeras estrellas
300 millones de años
después (8 de enero)



Cúmulos de Galaxias
3000 millones de años
(20 de marzo)



Formación del sistema solar
9000 millones de años
(26 de agosto)

0 segundos: Big Bang: Nacimiento del Universo.

10^{-43} segundos: Era de Plank o de la gravedad cuántica: La materia, la energía, el espacio y el tiempo comienzan abruptamente con el Big Bang.

10^{-34} seg: Inflación cósmica: En un tiempo extremadamente corto, quizás 10^{-34} segundos, después del Big Bang, apareció una sopa de quarks . Aquí se presentó una expansión cósmica conocida como inflación: el Universo se expandió 10^{30} veces. Es como si una moneda de un centímetro de diámetro súbitamente alcanzará diez millones de veces la anchura de la Vía Láctea. Un valor bastante mayor que el de la velocidad de la luz en el vacío, que es el límite máximo de velocidad, pero que no se aplica a la expansión misma del espacio.

380.000 años: el Universo se enfría y se vuelve transparente.

300 millones de años: se forman las primeras estrellas y galaxias. La gravedad continúa ampliando las diferencias de densidad en el gas que llena el espacio.

1.000 millones de años: límite de las observaciones corrientes. Los objetos se hallan fuertemente corridos hacia el rojo.

3.000 millones de años: se forman los cúmulos de galaxias

9.000 millones de años: se forma el sistema solar

10.000 millones de años: la energía oscura adquiere importancia y la expansión comienza a acelerarse

13.800 millones de años: hoy.

A Margarita:
*... se fue la niña bella,
bajo el cielo y sobre el mar,
a cortar la blanca estrella
que la hacía suspirar.*

RUBEN DARIO

3. Galaxias y estrellas

La materia del Universo no está repartida de una manera uniforme; si lo estuviera, el cosmos tendría el aspecto de un espacio casi vacío; algo así como un átomo por metro cúbico. Lo que se observa es muy distinto. Debido a la atracción gravitatoria, la materia se concentra en regiones del espacio: billones de estrellas se agrupan en galaxias que, a su vez, se reúnen en cúmulos y supercúmulos, separados por inmensas regiones de espacio prácticamente vacío. Por eso, el mejor lugar para localizar una galaxia es junto a otra.

¿Cómo surgieron las galaxias?

En 1992, el satélite Explorador Cósmico de Fondo de la NASA, descubrió que la intensidad de la radiación cósmica de fondo tiene una ligera variación –un 0.001 por ciento- reflejando unos ligeros grumos en la distribución de la materia, suficientes para actuar como semilla para las galaxias y las estructuras más grandes que emergieron más tarde, por acción de la gravedad. El estudio de estas variaciones, a través del cielo, permitió detectar la densidad y la composición total del Universo y aportó indicaciones de sus primeros momentos.

Los astrónomos pueden retroceder en el tiempo mirando el espacio con telescopios. Entre más potente sea el telescopio, más atrás en el tiempo se puede retroceder. La luz proveniente de las galaxias distantes revela una época más temprana y la cantidad de luz que se ha corrido hacia el rojo indica cuánto ha crecido el Universo en el tiempo transcurrido. El telescopio infrarrojo de 6.5 metros de la estación espacial James Webb, el de 10 metros de Mauna Kea y ALMA, en Atacama, al norte de Chile, con una red de 64 discos, permiten observar el nacimiento de las primeras estrellas y galaxias, unos pocos billones de años después del Big Bang.

Si suponemos que en la época primitiva la materia estaba repartida de manera más o menos uniforme por todo el espacio, al bajar la temperatura y por influencia de la gravedad, habría comenzado a acumularse materia al azar, en forma de aglomerados. Estos aglomerados darían origen a las galaxias. Sin embargo, según los cálculos, un proceso al azar como éste hubiera tardado más que la edad del Universo en ocurrir.

Las simulaciones por computador pueden indicarnos cómo aparecieron las estrellas y galaxias cuando el Universo tenía cien millones de años de antigüedad. Antes de eso, el Universo atravesó un tiempo denominado la “edad oscura” cuando el espacio estaba muy oscuro y lleno de una mezcla de cinco partes de materia oscura y una parte de hidrógeno y helio, que se adelgazó cuando el Universo se expandió. La materia era ligeramente desigual en densidad y la gravedad actuó para amplificar estas variaciones ya que las regiones más densas se expandieron más lentamente que las menos densas y comenzaron a colapsar. Cada una de estas regiones contiene cerca de un millón de masas solares. Estos fueron los primeros objetos del Universo. La parte del Universo observable para nosotros está compuesto de billones de galaxias, de las cuales la Vía Láctea, nuestra galaxia, es solo una más. Cada galaxia contiene unos 100 billones de estrellas y, probablemente, un número similar de planetas. Sin embargo, la mayor parte del Universo actual es un vacío intergaláctico que contiene, como máximo, solo un gas extremadamente tenue.

Las galaxias se mantienen juntas debido a la materia oscura pero el Universo continúa expandiéndose debido a una misteriosa forma de energía oscura (diferente a la materia oscura) cuya fuerza gravitacional es más de repulsión que de atracción.

Se ha llegado al consenso de que el Universo primitivo estuvo dominado por un pequeño número de galaxias gigantes conteniendo colosales agujeros negros y prodigiosas explosiones de formación de estrellas, mientras que en el Universo actual la creación de estrellas y el aumento de masa en los agujeros negros está ocurriendo en un gran número de galaxias más pequeñas que las iniciales. Quizás esto sea una consecuencia de la expansión cósmica.

Forma de las galaxias



Forma de las galaxias

Las galaxias pueden tener formas diversas. Hubble las organizó en tres grupos: espirales, elípticas e irregulares. Un 75 por ciento de las galaxias, incluida la nuestra –la Vía Láctea- son espirales; un 20 por ciento son elípticas y el resto son irregulares. Su forma depende de la velocidad con que han ido gastando su gas para crear estrellas. Se cree que las galaxias elípticas se forman por acumulación de las irregulares. Algunas galaxias con forma elíptica pueden ser cien veces más grandes que la Vía Láctea mientras que, en el otro extremo, las pequeñas galaxias irregulares pueden tener una milésima parte de la materia que tiene la nuestra. El navegante Fernando de Magallanes, durante su viaje alrededor del mundo, descubrió dos minigalaxias de este tipo que actualmente se conocen como Nubes de Magallanes. Los brazos de las galaxias espirales son las salas de maternidad para el nacimiento de nuevas estrellas.

Parece que las galaxias raramente se han formado de manera aislada; la mayoría pertenecen a algún tipo de cúmulo que puede contener de tres o cuatro a varias docenas de galaxias. Nuestro cúmulo está formado por un grupo de 19 galaxias, repartidas por una región del espacio de unos tres millones de años luz de largo.

La Vía Láctea, nuestra galaxia, contiene unos 100.000 millones de estrellas en un disco de 100.000 años-luz de largo y 3.000 años-luz de espesor; en el centro, el espesor es de unos 16.000 años-luz. Según los últimos estimativos, la formación de nuestra galaxia comenzó hace unos 13.000 millones de años y aún no termina porque la Vía Láctea se está tragando a pequeñas galaxias satélites e incorporando sus estrellas.

Formación de las estrellas

El proceso de formación de estrellas y de nuestro Sol, en particular, se conoce bastante bien puesto que hay millones de estrellas observables que podemos comparar entre sí; entre ellas, miles similares a nuestro Sol. Es posible que estas estrellas, en el momento de su formación, hubieran adquirido sus propios sistemas planetarios.

Las estrellas no surgieron todas de una vez sino que continuamente se están formando, evolucionando y cambiando, en períodos de tiempo muy grandes. Sin embargo, parece que el ritmo global de formación de estrellas no ha sido siempre el mismo y ha descendido drásticamente durante la segunda mitad de la historia del Universo.

Las estrellas aparecen cuando las nubes interestelares calientes, constituidas por gas, principalmente hidrógeno en forma molecular (H_2) y polvo (partículas microscópicas de

carbono, principalmente en forma de grafito, y otros elementos como silicio) se contraen por atracción gravitatoria. Las nubes estelares, de las que se forman las estrellas, alcanzan masas de hasta cien mil veces la masa del Sol y llegan a medir más de 300 años luz; una masa y un espacio enormes comparados con los que finalmente tienen las estrellas.

El interior de las nubes estelares se condensa en un núcleo denso que tiene un diámetro de algunos meses-luz, una densidad de 30.000 moléculas de hidrógeno por centímetro cúbico y una temperatura de diez grados Kelvin (-263 °C). La contracción comienza en el centro y se extiende hacia la periferia. A medida que la estrella se vuelve más compacta aumenta su temperatura interna, hasta alcanzar unos diez millones de grados Kelvin. A esta temperatura el hidrógeno se fusiona para formar helio. Esta reacción y otras de fusión nuclear similares, constituyen la fuente de luz y de calor de las estrellas.

El calor liberado por la fusión ejerce una presión hacia afuera que impide que la estrella se contraiga bajo su propio peso. La contracción se detiene y la estrella se estabiliza con un tamaño y una producción de energía más o menos constante. Las estrellas más brillantes y calientes son las que tienen mayor masa.

Ya que la producción de energía en las estrellas se alimenta de la desintegración de los núcleos atómicos, su composición química varía con el tiempo: en las más jóvenes predominan el hidrógeno y el helio mientras que en las más antiguas predominan elementos más pesados los cuales permiten que el gas absorba radiación de manera más eficiente con lo cual la estrella se mantiene a temperatura más baja; estas estrellas son de color rojo. Las más grandes tienen temperaturas más altas y consumen el hidrógeno más rápidamente; es decir, la temperatura es proporcional a la fusión del hidrógeno.

Muchos de los elementos que se encuentran en la Tierra y que forman parte del suelo o de nuestro organismo se originaron en el interior de una estrella.

Masa de las estrellas

La masa de la mayoría de las estrellas se ubica en un rango que va de una décima hasta diez veces la masa del Sol. De la observación de las galaxias vecinas se descubrió que simultáneamente se forman un pequeño número de estrellas de gran masa (unas diez veces la masa del Sol) y un gran número de estrellas de masa pequeña (como el Sol) en proporción de uno a veinte. Las estrellas de gran masa solo viven unas decenas de millones de años, un tiempo corto en los estándares galácticos.

La rata de formación de estrellas ha disminuido desde cuando el Universo estaba en su adolescencia, en sus primeros cuatro mil a seis mil millones de años de edad. En esa época, la velocidad de formación de las estrellas era cientos de veces mayor que la actual.

Nuestro Sol tiene suficiente combustible para otros 5.000 millones de años pero estrellas con masa superior pueden gastar todo su combustible en tan sólo cien millones de años o menos. Una estrella con una masa unas veinte veces superior a la del Sol puede existir solo un milenio y posiblemente se convierta en un agujero negro. Cuando una estrella se queda sin combustible se enfría y se contrae.

No siempre se forma el mismo tipo de estrella o la misma clase de astro. Lo que resulte va a depender de la cantidad de materia que intervenga en el proceso. Las nubes de gas –fundamentalmente hidrógeno y helio- y polvo –constituido por elementos pesados: hierro, silicio, carbono, etcétera que se formaron en el interior de estrellas que posteriormente explotaron- pueden atraer gas y polvo de las zonas vecinas hasta formar una configuración más o menos estable que se denomina **protoestrella**. Al principio, una porción de la nube interestelar se contrae bajo el efecto de la gravedad que actúa sobre el grupo cada vez más denso de átomos; es como si se encogiera bajo la presión de su propio peso. Cuando la nube se contrae hasta alcanzar una extensión de una décima parte de un año-luz, su temperatura se eleva a casi cero grados centígrados. Todavía es más fría que la temperatura ambiente actual en la Tierra pero mucho más caliente que la nube interestelar.

Las nubes se condensan desde el centro hacia afuera: el material del centro se aglomera de manera muy rápida mientras que el gas exterior permanece estático. En el centro, la concentración de gas forma una estrella de un segundo-luz (300.000 kilómetros) de diámetro- A medida que la protoestrella se hace más compacta, los átomos chocan más frecuentemente y calientan la porción de gas.

A menudo, dos o más centros de condensación de materia se forman en zonas cercanas y originan configuraciones que gravitan una alrededor de la otra; estos centros terminan constituyendo sistemas de estrellas dobles (o múltiples). La mayoría son binarias: una gira alrededor de la otra.

Cuando la masa de la esfera inicial es superior al diez por ciento de la masa del Sol aparece un nuevo fenómeno que cambia radicalmente la evolución del astro y provoca la formación de una estrella. En este caso, se llegan a alcanzar durante la contracción, en las zonas centrales de la esfera, presiones y temperaturas elevadas que acaban por provocar la reacción de fusión del

hidrógeno presente en la nube inicial. Mientras que en las capas exteriores de una estrella la temperatura es de miles de grados, en sus capas internas es de millones de grados.

La reacción que une los núcleos de hidrógeno para formar núcleos de helio es un proceso análogo al que tiene lugar en las explosiones de las bombas de Hidrógeno, en donde se desprende una gran cantidad de energía. Si la estrella es de tipo solar, la temperatura del núcleo estelar alcanza valores de 15 millones de grados. En estrellas con una masa superior, la temperatura interna es también mayor. Se alcanza, así, un estado de equilibrio en el que el calor producido por la fusión del hidrógeno, en el corazón de la estrella, impulsa el gas hacia el exterior mientras que la gravedad ejerce el efecto contrario.

Gigantes rojas, enanas blancas, novas y supernovas

La forma de extinguirse una estrella depende de su masa. Paradójicamente, entre más combustible posea una estrella, al principio, más pronto se le acaba. Las estrellas masivas o sea aquellas con un peso superior a ocho masas solares explotan repentinamente como **supernovas**. Las estrellas más modestas, como nuestro Sol, tienen una existencia más prolongada. En vez de detonar en el núcleo de la estrella, van quemando su combustible, el hidrógeno, de manera espasmódica. Se establece un equilibrio entre la tendencia de la estrella a contraerse y la tendencia del gas interno a escapar por acción de las altas temperaturas. Ese equilibrio se mantiene durante un tiempo muy largo: unos 10.000 millones de años de modo que nuestro Sol, con sus 5.000 millones de años, solo está en la mitad de su vida. Cuando se agota el combustible nuclear, la parte externa de la estrella se hincha hasta multiplicar su tamaño inicial cientos de veces formando lo que se denomina una **gigante roja**. Luego pierde su envoltura (alrededor de la mitad de su masa) la cual es arrojada hacia el espacio exterior en forma de **viento estelar**. El resto de la estrella se sigue contrayendo a medida que se enfría y reduce su tamaño hasta alcanzar un diámetro similar al de la Tierra. Su masa es más o menos la mitad de la del Sol y la densidad en su interior, de cientos de toneladas por centímetro cúbico. Se convirtió en una **enana blanca**. A partir de este momento se seguirá enfriando y perdiendo luminosidad hasta hacerse invisible.

Una **gigante roja** es, por lo menos, unas 250 veces más grande que el Sol y éste, a su vez, unas cien veces mayor que una enana blanca.

Por lo menos la mitad de las estrellas que se observan durante la noche son, en realidad, pares de estrellas que orbitan una alrededor de la otra. Pueden estar muy lejos entre sí y actuar de manera independiente o, por el contrario, pueden estar muy próximas. Si este último es el

caso es probable que una de las dos sea bastante masiva, como una enana blanca, y atraiga fuertemente a la otra. En tal evento, parte de la masa de la estrella normal puede caer hacia la enana blanca y provocar una explosión bastante intensa conocida como **nova**, que hace que durante un período breve aumente el brillo de la estrella entre 10.000 y 1.000.000 de veces, rivalizando con las estrellas más brillantes del cielo. En nuestra galaxia se producen unas 25 novas por año.

La muerte de una estrella, con una masa por lo menos unas ocho veces superior a la del Sol, es un suceso brusco y violento. En las regiones centrales de una estrella de este tipo, las presiones y las temperaturas son muy elevadas. Al igual que en las demás estrellas, el hidrógeno se transforma en helio. Cuando se agota el hidrógeno, el núcleo de la estrella se contrae puesto que la fuerza de atracción es mayor que la producción de energía que tiene el efecto contrario: expandir la estrella. En ese momento, se inician otras reacciones de fusión: a partir del helio se forma carbono y, a partir de éste, neón, oxígeno y finalmente silicio. Cada una de esas reacciones conduce a una liberación de energía. Un último ciclo de fusión combina los núcleos de silicio para formar hierro, el cual constituye el final de la línea de fusión espontánea. En este momento, cuando la estrella ya no cuenta con combustible nuclear, se contrae bajo su propio peso, en menos de un segundo. Las capas exteriores de la estrella se desploman tras el núcleo y chocan contra la superficie dura. En ese choque violento, el núcleo se comprime y el material de las capas exteriores rebota hacia el exterior de la estrella expulsando el material a velocidades enormes y produciendo lo que se conoce como **rayos cósmicos**. Esta explosión que se conoce como **supernova** ocurre en milisegundos y es la más potente del Universo, después del Big Bang. La estrella que explota puede fulgar con más brillo que una galaxia entera, compuesta por miles de millones de estrellas. En el curso de meses logra emitir tanta luz como la que despide el Sol en mil millones de años y los restos de la explosión se pueden detectar sobre el medio interestelar vecino durante al menos 100.000 años.

Una supernova es un suceso raro; en nuestra galaxia sólo se han registrado tres a lo largo de los últimos mil años; la más brillante, anotada por los astrónomos chinos en el año 1054, originó la capa de gas en expansión conocida como Nebulosa del Cangrejo. De acuerdo con los astrónomos chinos, durante los primeros días que siguieron a su aparición, la estrella fue tan brillante como la luna llena. Lucía más que el resto de nuestra galaxia junta. Su brillo duró escasos días; poco a poco se fue apagando hasta perderse de vista. En 1604 se observó otra supernova que fue registrada por Kepler y otros astrónomos.

Los despojos mortales de las supernovas sirven de viveros solares. Allí se pueden formar nuevas estrellas que vuelven y repiten todo el ciclo estelar de nacimiento y muerte. Se considera que las supernovas son las responsables de los elementos pesados que hay en el Sol, en la Tierra y en los organismos vivos que la habitan.

Estrellas de neutrones, pulsares, agujeros negros y cuásares

Una enana blanca, al contraerse, o el residuo que queda después de la explosión de una nova o una supernova se puede convertir en **estrella de neutrones**, una esfera con una densidad muy alta, que gira rápidamente sobre sí misma e irradia ondas electromagnéticas. El paso a estrella de neutrones siempre es un proceso brusco, no gradual.

La masa de una estrella de neutrones es de una a tres veces la masa del Sol pero con un radio de solo unos diez kilómetros (una tercera parte de Bogotá) lo que implica que su densidad debe ser del orden de unos cien millones de toneladas por centímetro cúbico (una cucharada pequeña de una estrella de neutrones pesaría el equivalente al monte Everest) y una temperatura de unos cien mil millones de grados.

En 1967, Jocelyn Bell, una estudiante posgraduada de la Universidad de Cambridge, observó que en el registro gráfico del centelleo interplanetario de radiofuentes aparecían unas débiles señales separadas por intervalos regulares de 1.3 segundos. Durante algún tiempo se especuló que estos pulsos podrían ser señales procedentes de otras civilizaciones. Pero no contenían ningún mensaje o código por lo cual se desechó esta posibilidad. Del análisis cuidadoso de aquellas observaciones se estableció que tales emisiones provenían de un objeto astronómico de naturaleza hasta entonces desconocida al cual se denominó **pulsar** (contracción de *pulsating radio source*: radiofuente pulsante).

Para explicar la naturaleza de los pulsares se barajaron varias hipótesis. La extraordinaria regularidad de los impulsos indicaba que deberían ser ocasionados por un objeto en rotación y la brevedad de sus impulsos insinuaba que se trataba de un objeto pequeño y masivo. Los objetos que más se acomodaban a estas características eran las **estrellas de neutrones**. Estas se comportan como faros que, en cada vuelta, emiten un haz de radiación. Si un observador en la Tierra enfoca una antena de radio hacia el punto donde se encuentra el astro, recibirá una señal cada vez que la estrella da una vuelta sobre sí misma. Entre más antiguo el pulsar más lenta su rotación.

Si la masa de una estrella de neutrones sigue creciendo por absorción de materia de una fuente externa, se llega a un punto en que la sopa de neutrones del interior ya no es capaz de soportar el peso del astro. La estrella empieza, entonces, a hundirse sobre sí misma hasta convertirse en un **agujero negro**, cuya fuerza de gravedad es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar de allí; de ahí su nombre. Por lo tanto, solo se puede detectar por la energía que liberan,

en forma de radiación visible, ultravioleta o rayos X, una estrella compañera –si es que hay alguna- o el **disco de acreción** (acumulación de gas y polvo que gira en forma de disco) al ir cayendo en forma espiral, hacia el agujero negro, por efecto de la fuerte atracción gravitatoria que este ejerce sobre la materia que está cerca o que le rodea.

Cuando un agujero negro está aislado no ofrece ninguna indicación visible de su presencia. Pero la materia que llega a sus proximidades cae en espiral hacia el agujero negro, se calienta enormemente y emite poderosas radiaciones que se pueden detectar en la Tierra, antes de desaparecer para siempre. En los centros de las galaxias activas o alrededor de los mismos se presentan potentes radioemisiones y otros fenómenos extraños que se atribuyen a las partículas extraordinariamente calientes que giran en torno al agujero negro. Es como si la región cercana al centro de la galaxia alojara una masa de tres a cuatro millones de soles; mucho más de lo que cabría esperar de sólo las estrellas, lo cual hace pensar a los científicos que todas las galaxias tengan agujeros negros en sus centros. A lo largo de millones de años, el agujero negro aumentará paulatinamente su masa y podría llegar a vaciar de materia a la región cercana, con lo cual cesaría toda actividad. Así, en el centro de nuestra galaxia se encuentra un agujero negro supermasivo que los astrónomos han llamado Sagitarius A y alrededor de éste, desde hace miles de millones de años, se ha acumulado un enjambre de agujeros negros más pequeños que, eventualmente, caerán en Sagitarius A.

Si una estrella pasara demasiado cerca de un agujero negro, la diferente atracción gravitatoria entre las partes de la estrella más cercanas y más alejadas al agujero, lo desgarrarían. Al destrozarse la estrella se libera gas caliente que produce alguna radiación y se puede detectar. ¿Por qué la luz no puede escapar de un agujero negro?.

Si sobre la superficie de la Tierra lanzamos hacia el espacio un cohete con una velocidad menor de 11.2 kilómetros por segundo (velocidad de escape), el cohete subirá perdiendo velocidad, atraído por la gravedad de la Tierra, hasta que finalmente se detiene, se devuelve y cae sobre la superficie del planeta. Por el contrario, si la velocidad es superior a la velocidad de escape, el cohete se alejará de la Tierra, liberándose de su atracción. Entre mayor sea la fuerza de gravedad en la superficie de un astro, mayor será su velocidad de escape.

Si un astro tiene una velocidad de escape superior a la velocidad de la luz -300.000 kilómetros por segundo- que, según la teoría de la relatividad de Einstein es la mayor velocidad a la que algo se puede mover, es claro que ni la luz misma podrá escapar de ese astro, hacia el espacio exterior. Se habrá convertido en un agujero negro.

A finales de la década de 1970 se lanzó al espacio el Observatorio Einstein con el cual se pudo detectar una serie de objetos denominados cuasi-estelares o **cuásares** que emitían rayos X con gran intensidad. Los cuásares son los objetos observables más distantes y nos indican cómo era el Universo hace miles de millones de años; se alejan de la Tierra a enormes velocidades; en algunos casos a más del noventa por ciento de la velocidad de la luz. Se encuentran mucho más allá de las galaxias más remotas conocidas. Al observar los cuásares los astrónomos viajan por la historia cósmica remontándose hasta la era en que el Universo tenía un tamaño menor que una quinta parte del actual. Ellos piensan que estos cuásares remotos brillaban cuando el Universo tenía solo mil millones de años de edad. Y el brillo tan extraordinario se debe a la energía producida cuando las estrellas y las nubes de polvo caían hacia un agujero negro situado en su centro. Esos cuásares devoraban, a una enorme velocidad el material que les caía. En contraste, los agujeros negros supermasivos más recientes son devoradores más moderados. Los científicos todavía no determinan qué mecanismo es el responsable de este comportamiento. Una posibilidad es que los agujeros negros más recientes tienen menos gas que consumir.

Formación de elementos

Cuando se alcanza el estado de equilibrio, las estrellas permanecen en él durante períodos que oscilan entre varios miles de millones de años, en el caso de las de menor masa y algunas decenas de millones de años, para los de mayor masa. Es decir que, paradójicamente, entre mayor sea la masa de una estrella, menor es su tiempo de existencia. O, entre mayor masa tenga una estrella, más pronto la quema.

Al final del período de existencia de una estrella, cuando el hidrógeno se va agotando, se pueden iniciar otras reacciones de núcleos atómicos más pesados, como el helio, el carbono y otros más, que mantienen la temperatura y la presión interiores a los niveles necesarios para prolongar el estado de equilibrio de la estrella. Sin embargo, el elemento más pesado que se puede sintetizar de esta forma es el hierro.

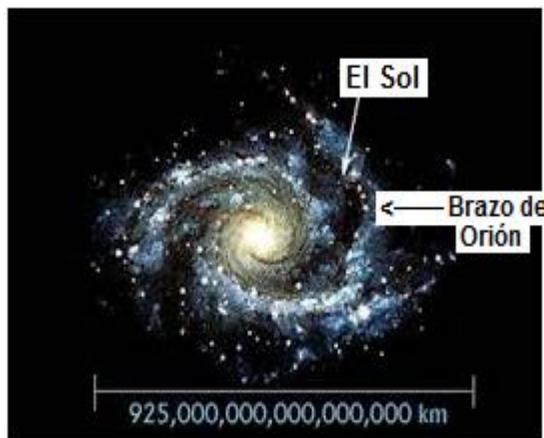
Entonces, todos los elementos más ligeros que el hierro existentes en la Tierra y en los demás planetas y en nuestros cuerpos –carbono, aluminio, oxígeno, azufre, cinc y silicio- se crearon en los hornos nucleares de los centros de las estrellas que desaparecieron hace miles de millones de años. Es emocionante y sorprendente saber que el hierro y otros elementos que forman parte de nuestro organismo provengan de una estrella que ya desapareció.

Los elementos más pesados que el hierro, como el oro y el platino, se forman en la explosión de las supernovas.

Y en medio de todo permanece el Sol. Pues, ¿quién en este bellissimo templo pondría esta lámpara en otro lugar mejor, desde el que pudiera iluminarlo todo?

COPERNICO

4. El rey Sol



Posición del Sol en la Vía Láctea

El Sol, junto con la Tierra y los demás planetas del Sistema Solar, se encuentra ubicado en el brazo de Orión, uno de los brazos espirales de la Vía Láctea, a unas dos terceras partes de distancia del centro de la Vía Láctea lo que equivale a unos 25.000 años-luz. Para desilusión nuestra habitamos un planeta, el tercero, que gira alrededor del Sol, una estrella bastante común, que no se encuentra en algún lugar especial de la Vía Láctea, que tampoco tiene nada destacable respecto a las otras galaxias.

El Sistema Solar, formado por el Sol y sus planetas, viaja a unos 20 kilómetros por segundo, hacia la estrella Vega y efectúa una rotación alrededor de la Vía Láctea cada 250 millones de años; hasta ahora ha dado unas veinte vueltas.

El Sol tiene una masa que representa el 99.9 por ciento del Sistema Solar. Es decir que los planetas, en su conjunto, tienen una masa que equivale solo al 0.1 % de la masa del Sistema Solar. El diámetro del Sol es de 1.400.000 kilómetros. Es una estrella muy corriente, como debe haber millones similares en la Vía Láctea.

Un fotón, la unidad de energía lumínica, tarda un millón de años en viajar desde el centro del Sol hasta su superficie. Si la luz pudiera ir directa y libremente, en lugar de ser absorbida y reemitida continuamente en direcciones al azar, tardaría menos de dos segundos. Esa notable lentitud del flujo de energía en el interior del Sol es de gran importancia para la vida pues asegura un suministro estable de energía.

El Sol emite cada segundo tanta energía, en todas las direcciones, como la que recibe la Tierra en cien años. Para que el Sol pueda emitir semejante cantidad de energía se requiere que, en su interior, cada segundo, 650 millones de toneladas de hidrógeno se conviertan en 645.5 millones de toneladas de helio. La diferencia, 4.55 millones de toneladas, se transforma en energía, cada segundo. Una parte muy pequeña de esta energía nos llega en forma de luz y calor. En este proceso, en la parte más interna del Sol, se alcanzan temperaturas superiores a los diez millones de grados. Esta parte central es también la más densa. Aunque el núcleo del Sol es apenas 1.6 por ciento de su volumen total, alberga la mitad de su masa.

Origen del Sol y sus planetas



Formación del Sistema Solar

Probablemente el Sol empezó, hace unos 4.600 millones de años, como una bola de gas y polvo, que contenía residuos de generaciones anteriores de estrellas, en lenta rotación alrededor de su propio eje. Esta bola, en sus inicios, tenía el tamaño aproximado de todo el Sistema Solar. Al contraerse, debido a la atracción de su propia gravedad, empezó a girar cada vez más de prisa (similar a un patinador que encoge sus brazos y su cuerpo para girar más rápido). El polvo y el gas en el plano ecuatorial formaron un disco que rotaba cada vez más veloz alrededor del Sol hasta que el disco se desgajó.

Los elementos ligeros, como el hidrógeno y el helio, se situaron en el borde del disco y originaron los planetas gaseosos más externos: Júpiter, Urano, Saturno y Neptuno. Esta distribución está de acuerdo con la disminución de la densidad de los planetas a medida que se alejan del Sol. Así, Mercurio, el planeta más cercano al Sol, tiene una densidad de 5.43 gramos por mililitro (como referencia, el agua tiene una densidad de 1.0 gramo por mililitro) mientras que Neptuno, el más alejado, tiene una densidad de 1.66 gramos por mililitro, una densidad baja que está de acuerdo con la composición de elementos ligeros y volátiles de los planetas externos.

Supernova, ¿semilla del Sistema Solar?

A mediados del siglo pasado, Ernst Öpik, del Observatorio Armagh, de Irlanda del Norte, sugirió que una supernova podía desencadenar el nacimiento de otras estrellas. Entre los cien mil millones de estrellas de nuestra galaxia se producen probablemente tres supernovas por siglo. Sin embargo, a pesar de su rareza, las supernovas representaron el papel de semilla en el origen del sistema solar. Mucha de la materia que se reunió para formar el Sol y los planetas era polvo y gas expulsados por las supernovas a lo largo de un período de varios miles de millones de años. Parece que una enorme estrella explotó en la vecindad del embrionario Sistema Solar por la época en que el sistema se condensó. Los indicios provienen del estudio de los elementos químicos en los meteoritos y, en particular, de medidas de la abundancia de varios isótopos de ciertos elementos. En muestras de materia procedente de la clase más primitiva de meteoritos, la abundancia relativa de algunos isótopos es diferente a la que se encuentra en la Tierra, en las rocas lunares y presumiblemente en todos los demás cuerpos del Sistema Solar. Las anomalías referentes a los isótopos se pueden explicar admitiendo que en el Sistema Solar se inyectó materia procedente de una supernova, solo algunos millones de años antes de que los meteoritos se solidificaran.

La mayor parte de las anomalías isotópicas se encontraron por primera vez en un meteorito que cayó en 1969, cerca al pueblito de Allende, en el norte de México.

La supernova, además de aportar materia para la formación del Sistema Solar, proporcionó la fuerza de compresión suficiente para formar una estrella, el Sol. En efecto, los cálculos teóricos muestran que una nube de polvo y gas, aislada, suficientemente difusa y con una masa comparable a la del Sol, no puede contraerse bajo la influencia de su propia gravedad, a menos que exista un estímulo externo ya que la presión interna del gas impide la condensación de la nube. La explosión de la supernova provocó ondas de choque que comprimieron la nube difusa de gas en un volumen menor.

El futuro del Sol

Es fácil calcular que el Sol está perdiendo unos cuatro millones de toneladas cada segundo aunque esto es casi inapreciable para un objeto tan gigantesco que contiene una masa total de unos mil cuatrillones (10^{27}) de toneladas. Hasta principios del siglo XX fue inexplicable esta prodigiosa desaparición de masa hasta cuando los físicos descubrieron en el interior de los núcleos atómicos una fuerza muy intensa, mayor que cualquiera conocida hasta entonces y la responsable de la extraordinaria producción de energía del Sol.

El Sol está compuesto principalmente de hidrógeno y helio (éste se descubrió primero en el Sol que en la Tierra). Como mencionamos anteriormente, cada segundo el Sol pierde cuatro millones de toneladas de hidrógeno, que se convierten en Helio. Este ritmo de pérdida de hidrógeno, muy grande para nuestros estándares, podría prolongarse durante varios miles de millones de años sin que se agoten las reservas del Sol. De hecho, cuando hayan transcurrido alrededor de 5.000 millones de años y el Sol comencé a transformarse en una gigante roja, habrá convertido en energía solo una milésima de su masa. Este es un gigantesco horno nuclear alimentado por la potencia de fusión del Hidrógeno, con una temperatura en su centro extremadamente alta. Equivale a la explosión controlada de diez mil millones de bombas de Hidrógeno, cada segundo.

¿Qué sucederá cuando se haya transformado cada vez más Hidrógeno en Helio y éste se vaya acumulando en el centro del Sol?

En los próximos cinco mil millones de años no pasará casi nada. Pasados 10.000 millones de años desde el nacimiento del Sol, la luminosidad será ya el doble de la actual. La humanidad, suponiendo que todavía exista, sufrirá desde hace tiempo dificultades climáticas, pero la situación empeorará todavía más. En primer lugar, el globo solar será el doble de grande que ahora.

Mientras tanto, en el interior del Sol, se habrán producido cambios sustanciales. En el centro se habrá gastado todo el hidrógeno de tal manera que la región central estará ocupada por una esfera de helio. En esta esfera será imposible la combustión nuclear porque todo el hidrógeno se habrá agotado y la temperatura será demasiado baja para la fusión del helio. La fusión del hidrógeno continuará únicamente en la superficie de esta esfera de helio, cuya masa aumentará progresivamente. Antes, el Sol quemaba hidrógeno en una región central; ahora lo hará en la corteza y se irá comiendo las capas exteriores ricas en hidrógeno. A medida que pasa el tiempo aumentará la masa de la esfera central de helio.

El globo solar aumentará de tamaño y, al mismo tiempo, se enfriará. Al cabo de unos 10.000 millones de años el Sol tendrá un tamaño cien veces mayor que ahora y su luminosidad será 2.000 veces superior. Sin embargo, la temperatura superficial habrá disminuido bastante, manteniéndose en 4.000 grados.

Hace tiempo que los océanos de la Tierra se habrán evaporado. La Tierra se transformará en un horno ardiente que no puede ya albergar vida alguna. Un enorme globo solar, que ocupará más de la mitad del cielo diurno, brillará sobre la superficie terrestre abandonada por la vida.

Formación de los planetas

Muchas estrellas, quizás la mayoría, parece que forman parte de sistemas múltiples, en los que dos o más estrellas describen órbitas una alrededor de la otra. Esta situación podría no ser adecuada para formar un sistema planetario como el nuestro. Pero donde quiere que se forme una estrella aisladamente, también se formarían planetas como los del Sistema Solar.

Puede suceder que los restos de gas y polvo que gravitan alrededor de una estrella sean insuficientes para formar otra y entonces se condensan para generar planetas. Si la masa que se concentra es similar a la masa de la Tierra, la mayor parte del gas escapará durante el proceso de formación porque el gas está muy caliente y la fuerza de gravedad no es suficiente para retener la mayor parte de los gases. Debido a la alta temperatura, la materia resultante del polvo se halla en estado líquido de tal manera que la esfera es ahora una bola de magma en fusión. A medida que la capa externa se enfría irradiando calor al espacio, se condensa, generando una corteza sólida de espesor creciente. Aunque las presiones del interior son altas (densidades de unas diez veces la del agua) no bastan para comprimir la materia del centro, en proporción importante. Esa es, en esencia, la evolución, en sus orígenes de Venus, la Tierra o Marte.

Si la masa de la esfera inicial es mayor que la de la Tierra pero menor que la décima parte de la masa solar, la atracción gravitatoria retiene los gases. Las presiones en el centro comprimen el material hasta densidades superiores a treinta veces la del agua. Ese es el caso de Júpiter y Saturno.

Probablemente el primer planeta en formarse fue Júpiter que es, con mucho, el mayor de los planetas (el radio de Júpiter es de unos 70.000 kilómetros). Su enorme gravedad debió afectar el proceso de formación de los demás planetas cuyo desarrollo debió tomar entre cien mil y cien millones de años.

Los planetas terrestres

Mercurio, Venus, Marte y la Tierra forman los planetas interiores o planetas terrestres o planetas rocosos del sistema solar.

Mercurio carece de atmósfera y está muy cerca al Sol por lo cual su temperatura en la superficie es muy alta para poder soportar cualquier forma de vida.

Los otros tres planetas interiores –Venus, Tierra y Marte- se formaron, de manera similar, por lo cual fueron semejantes en muchos aspectos. Así, presentaban en su superficie minerales parecidos y en su atmósfera, gases similares: dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua; los tres dispusieron, además, de un clima templado que les permitió mantener agua líquida en su superficie. La Tierra conservó una temperatura media, en su superficie, de 15 grados centígrados mientras que en los otros dos planetas la situación fue cambiando hasta la actual, donde la superficie de Marte se encuentra congelada a $-60\text{ }^\circ\text{C}$ y la superficie de Venus es un horno de $500\text{ }^\circ\text{C}$. ¿Por qué, esas diferencias?

El sentido común sugiere que la Tierra, con una temperatura media de 15 grados centígrados, se formó casualmente a la distancia correcta del Sol, mientras que Venus quedó muy cerca al Sol y Marte muy alejado.

Sin embargo, el registro geológico indica que la Tierra primitiva era más caliente que la que conocemos. Parte del planeta está hoy cubierto de glaciares; sin embargo, no hay ninguna señal de glaciaciones similares anteriores a 2.700 millones de años atrás. La explicación más plausible es que el efecto invernadero debió ser más intenso en un pasado remoto.

Pero además hay otro factor: la atmósfera de cada uno. La superficie de Marte está helada porque perdió la capacidad de desprender de nuevo dióxido de carbono a su atmósfera. Venus es un infierno porque experimentó el problema opuesto: no tiene manera de extraer dióxido de carbono de su atmósfera. La Tierra, por su parte, siempre ha gozado de un clima moderado y más o menos estable debido a un mecanismo cíclico que aumenta la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, cuando la superficie del planeta se enfría. El dióxido de carbono absorbe la radiación infrarroja; esta radiación genera calor que se reemite hacia la superficie del planeta, calentándola. Por el contrario, cuando el calor aumenta en la superficie de la Tierra, disminuye la concentración de CO_2 en la atmósfera y, con ello, la capacidad de captar la radiación infrarroja calórica; como consecuencia, la superficie del planeta se enfría. Por eso, solo en la superficie de la Tierra se encuentra agua en forma líquida que es crucial para la generación y el mantenimiento de la vida.

Además del agua líquida y la vida, la Tierra posee otras dos características poco comunes en los planetas interiores: un intenso campo magnético y un movimiento gradual de sus continentes (la deriva continental).

El ciclo del dióxido de carbono puede haber mantenido el clima terrestre dentro de límites razonables mientras el planeta evolucionaba. Si en Marte hubo un proceso similar, fue incapaz de hacer lo mismo en ese planeta.

¿Cabe la posibilidad de que Marte fuera frío desde el principio y que su clima haya experimentado pocos cambios en los últimos 4.600 millones de años? No parece verosímil. La superficie marciana está surcada por muchos canales que fueron, casi con certeza, excavados por agua corriente. Es decir, Marte conoció, tiempo atrás, temperaturas suficientes para retener el agua líquida. Debió tener, entonces, una proporción adecuada de dióxido de carbono pero se enfrió por su menor tamaño: la alta relación de superficie a volumen hizo que perdiera el calor a mayor velocidad. Con el tiempo, el interior se hizo tan frío que ya no pudo liberar dióxido de carbono hacia su atmósfera la cual se fue adelgazando y, en consecuencia, su temperatura fue disminuyendo hasta llegar al presente estado gélido. Marte todavía conserva una gran provisión de agua pero congelada de modo que es posible que vuelva a ser húmedo si un meteorito gigante chocara contra su superficie o si nuestros descendientes consiguen, de alguna forma, que Marte sea habitable para los humanos.

Venus, por su parte, está completamente deshidratado en su superficie a pesar de que tiene una atmósfera espesa de dióxido de carbono y ácido sulfúrico que atrapan el calor solar por el efecto de invernadero; pero también elevan la temperatura en la superficie hasta 500 °C, muy por encima del punto de ebullición del agua.

Los planetas interiores o terrestres (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), cuya masa, en conjunto, es sólo un 0.0005 por ciento de la masa solar, contienen elementos más pesados como el hierro, el carbono, silicio, níquel o incluso oro y uranio, mucho menos abundantes en el cosmos que el hidrógeno.

Cerca del Sol, el calor era suficiente para expulsar cualquier material fácilmente volatilizable, tal como el hidrógeno y el helio. Sin embargo, estos dos gases debieron constituir las atmósferas primitivas de los planetas terrestres hasta el momento en que el Sol comenzó a emitir un potente viento solar y una intensa radiación que barrieron, como un huracán, los sectores vecinos al Sol y eliminaron la atmósfera de los planetas interiores.

¿Vida en Marte?

Uno de los temas que más atrae la atención general es la posibilidad de vida en otros planetas u otros sitios del Universo. Si otro planeta del sistema solar tiene la posibilidad de albergar vida ese es Marte. Esa creencia viene desde el siglo XIX cuando el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli anunció que había observado grandes líneas a las que él llamó *canali*, que atravesaban la superficie del planeta. A principios del siglo XX, Percival Lowell insistía que

esas estructuras eran canales construidos por una civilización avanzada. Sin embargo, en las décadas de 1960 y 1970, el envío de las primeras sondas espaciales a Marte por los Estados Unidos y la Unión Soviética demostró que no había civilizaciones marcianas.

Lo que queda claro es que la situación presente de Marte no admite la presencia de vida. Su atmósfera solo contiene cantidades minúsculas de oxígeno y vapor de agua, dos condiciones esenciales para la existencia de la vida en la Tierra. Las temperaturas de las regiones más cálidas, incluso durante los veranos, no exceden los cero grados centígrados. Además, las sondas equipadas para detectar componentes orgánicos, con una concentración de uno en mil millones, no descubrieron ninguno en la superficie o a algunos centímetros de profundidad; tampoco alguna gota de agua líquida, uno de los requisitos fundamentales para que se desarrolle la vida. Sin embargo, las fotografías tomadas sugieren que hace unos miles de millones años y quizás hasta hace unos cientos de millones de años, la superficie del planeta fue esculpida por grandes volúmenes de agua.

El agua de Marte probablemente existía en forma de lagos ácidos y lechos poco profundos de agua salada como los que existen hasta ahora en algunos sitios de Australia.

Asteroides, meteoritos y cometas

A finales del siglo XVIII se detectó una regularidad aparente en el espaciado de los planetas, con excepción de la región entre Marte y Júpiter, en el límite entre los planetas internos y externos. De acuerdo con esta regularidad, allí debía existir un planeta importante pero, en su lugar, sólo hay un cinturón de miles de asteroides. Es probable que la atracción gravitatoria del Sol, por un lado, y del gigantesco Júpiter, por otro, haya impedido la condensación y acumulación de materia en la zona entre Marte y Júpiter. En su lugar, se encuentran unos cuerpos, los **asteroides** o planetoides, con un diámetro inferior a 1000 kilómetros. Se calcula que existen unos 40.000 asteroides en el Sistema Solar. A los cuerpos de dimensiones más reducidas se les denomina **meteoritos**. Una hipótesis para explicar la existencia de estos cuerpos es que se trata de restos de un planeta que no llegó a formarse.

El descubrimiento de hielo en los asteroides fortalece el punto de vista de que ellos suministraron agua a la Tierra.

En un asteroide que gira alrededor del Sol, entre Marte y Júpiter, se descubrió, por primera vez que en la superficie de un asteroide había agua, en forma de hielo, y componentes orgánicos.

Este hecho apoya la noción de que los asteroides pudieron haber suministrado a la Tierra primitiva agua para sus océanos y compuestos prebióticos que permitieron el desarrollo de la vida.

Se cree, aunque con grandes incertidumbres, que la existencia de los **cometas**, que parecen ser aglomerados de hielo y polvo, provenientes de los confines del Sistema Solar, se debe a procesos similares a los de la formación de los planetas. Probablemente, al final de la captación de materia, cuando la nebulosa solar alcanzó su radio máximo, unos 90.000 millones de kilómetros, sus capas externas se enfriaron rápidamente, de forma tal que el vapor de agua y otros gases se condensaron formando granos de hielo y otros sólidos. Estos, a continuación, formaron conglomerados de unos cuantos kilómetros, que todavía existen y que giran lentamente alrededor del Sistema Solar. Las mutuas colisiones y perturbaciones, incluyendo la influencia de estrellas que pasaran cerca, debieron estirar, unas cien veces, esta nube y desparramar su contenido sobre una capa esférica situada alrededor del sistema planetario.

La Luna

Con base en los datos aportados por los 382 kilogramos de rocas recogidas en seis sitios diferentes de la Luna y traídas a la Tierra, dentro del proyecto Apolo, se realizó en Kona, Hawai, en 1984, un congreso internacional para discutir las teorías sobre el surgimiento de nuestro satélite natural. Al final, se impuso la teoría del impacto gigantesco: mientras la Tierra estaba creciendo, el impacto de un gran proyectil, del tamaño de Marte, ocasionó la vaporización de la roca que orbitó alrededor de la Tierra. Estos pequeños cuerpos se agruparon y formaron la Luna. La cantidad de materia que el golpe del impacto le arrancó a la Tierra fue considerable: la masa de la Luna es $1/81$ de la masa de la Tierra, un valor muy alto para un satélite y un caso único en el Sistema Solar.

La agrupación de los pequeños cuerpos fue tan rápida que el calor generado por el proceso fundió la parte externa de la naciente luna y formó un océano global de roca líquida o magma. La corteza lunar se formó de los minerales de baja densidad que flotaron en la superficie de este océano de magma. A continuación, la corteza sufrió el impacto violento de cometas, asteroides y meteoritos. Algunos de los objetos que golpearon la superficie lunar fueron tan enormes que dejaron cráteres de más de 2.000 kilómetros de diámetro. Muchos cráteres se llenaron, durante los siguientes 300 a 400 millones de años, con lava basáltica, rica en hierro. Con el tiempo, el bombardeo cesó, con impactos que cada vez fueron menos frecuentes y menos potentes. Desde entonces, poco ha ocurrido en la Luna. Terminó el fuego de

los volcanes y la única actividad ha sido la formación ocasional de un cráter de impacto, la caída constante de meteoritos y el descenso de contadas naves espaciales, algunas con astronautas.

Las muestras lunares pusieron de manifiesto que la Luna y la Tierra tenían cantidades parecidas de los isótopos de oxígeno, lo cual indica un parentesco estrecho. Si la Luna se hubiera formado en otra parte del Sistema Solar su oxígeno probablemente hubiera tenido una composición isotópica diferente a la de la Tierra. La datación isotópica también puso de manifiesto que la Luna se formó al mismo tiempo que la Tierra, hace 4.500 millones de años. Alrededor de la Tierra habrían vagado numerosos cuerpos grandes, algunos del tamaño de Marte. La Tierra debió chocar con uno de ellos, a consecuencia de lo cual parte de los residuos fue puesto en órbita, ofreciendo así la materia prima de la Luna que se formó, sobre todo, a partir del cuerpo que se estrelló.

La Luna está seca por el incalculable calor que se produjo durante la colisión; las altas temperatura evaporaron el agua y las demás sustancias volátiles. El proyectil tuvo que golpear a la Tierra lateralmente, a una cierta distancia del eje central. Un impacto de este tipo habría acelerado la rotación de la Tierra hasta su valor actual. Los choques de esa índole son consecuencias naturales de la formación de los planetas; la composición de Mercurio y la gran inclinación de Urano se explican hoy mediante impactos gigantescos.

El estudio de la Luna, el primer objeto explorado por una nave espacial y el único visitado por los humanos es importante porque su superficie ha permanecido relativamente inalterada durante los últimos 3.000 millones de años, lo cual puede ayudar a entender cómo se formaron y desarrollaron los planetas rocosos internos: Mercurio, Venus, Marte y especialmente la Tierra.

Exoplanetas

En el siglo XVI, el filósofo italiano Giordano Bruno afirmó que el Sol era una estrella como cualquier otra y, por lo tanto, era posible que las demás estrellas estuvieran también orbitadas por planetas. Estas afirmaciones y otras similares le merecieron ser quemado en la hoguera por hereje.

El primer planeta por fuera del sistema solar o **exoplaneta** se detectó en 1995, midiendo los efectos gravitacionales que provocaba sobre su estrella y se denominó *51Pegasi*. Es un planeta con una masa mayor que la de Júpiter que gira bastante cercano a su estrella. La mayoría

de los exoplanetas descubiertos son similares, es decir, gigantes gaseosos con una masa mayor que la del planeta Júpiter, con órbitas muy cercanas a su estrella y períodos orbitales muy cortos. Más recientemente, se encontraron también estrellas alrededor de las cuales giran dos o más planetas. La Sonda Kepler, puesta en órbita por la NASA, en 2009, detectó más de 400 exoplanetas con dimensiones entre las de Neptuno y la Tierra. Sumando este descubrimiento a los anteriores, el número de exoplanetas descubiertos, hasta finales de 2014, se acercaba a los 1.800.

Comparados con las estrellas que orbitan, los planetas son fuentes muy tenues de luz por lo cual, de manera directa, solo unos pocos planetas extrasolares, muy grandes y brillantes se han podido detectar directamente. En la gran mayoría de los casos, los astrónomos han encontrado los exoplanetas, de manera indirecta, aplicando las técnicas de “bamboleo” o de “tránsito”.

En el método de “bamboleo”, cuando un planeta orbita una estrella, su gravedad hala, muy ligeramente, a su estrella parental. Analizando el espectro de luz procedente de la estrella, los astrónomos pueden medir cambios en la velocidad relativa de la estrella, hasta de un metro por segundo y, aún menos. Las variaciones periódicas revelan la presencia de un planeta.

En el método de “tránsito”, si la órbita de un planeta cruza la línea de luz entre su estrella parental y la Tierra, la luz recibida desde la estrella variará ligeramente, de forma similar a como un eclipse lunar disminuye la luz proveniente del Sol. Un planeta del tamaño de Júpiter, disminuye la luz proveniente de la estrella en un uno por ciento; para un planeta del tamaño de la Tierra, la disminución es del orden del 0.01 por ciento, un cambio que alcanza a ser detectado por el telescopio espacial Kepler.

La extensión en la cual un planeta disminuye la luz de la estrella parental es un indicativo del diámetro del planeta. Si se mide también el bamboleo, se puede disponer de la masa y el diámetro y, a partir de allí, calcular la densidad promedio. Si la densidad es alta, se trata de un planeta rocoso, como la Tierra. Si la órbita del planeta es muy cercana a la de la estrella –su año es menor que un día terrestre– su superficie debe permanecer constantemente fundida. De acuerdo con los datos recogidos hasta el momento, ninguno de los exoplanetas detectados es como el nuestro.

Un planeta rocoso debe comenzar como una mezcla de material fundido y caliente e ir irradiando calor al espacio.

En la actualidad, los científicos se inclinan a creer que la gran mayoría de las estrellas, si no todas, tienen su propio sistema planetario y no se puede descartar que haya vestigios de vida en, por lo menos, alguno de ellos.

Los astrónomos consideran que si se logra detectar oxígeno en la atmósfera de un exoplaneta es un indicio de que en ese astro existe vida pues el oxígeno es muy reactivo y se combina con todos los metales por lo cual rápidamente se acabaría a no ser que existan, sobre la superficie del exoplaneta, organismos vivos que repongan el oxígeno consumido, tal como sucede en la Tierra con las plantas.

5. La madre Tierra

La edad de la Tierra

Cuando se pensó en el origen de la Tierra una de las primeras inquietudes fue acerca de su edad. Desde tiempo atrás, los científicos habían percibido que el interior de la Tierra estaba caliente: la temperatura aumenta a medida que bajamos por el pozo de una mina; así mismo, las fuentes termales y las erupciones de lava son un testimonio adicional del gran calor existente en las profundidades del planeta. Los pensadores de los siglos XVIII y XIX supusieron que la Tierra se formó en estado de fusión y, desde entonces, se venía enfriando progresivamente. Considerando el estado actual de la Tierra y la velocidad ponderada de enfriamiento de los cuerpos sólidos, se obtuvo una estimación de su edad. Un siglo antes, Isaac Newton supuso que el interior de la Tierra estaba compuesto por hierro. Según sus cálculos, una esfera del tamaño de la Tierra, calentada al rojo, gastaría 50.000 años en enfriarse. Esa sería la edad de la Tierra. Sin embargo, desechó esta estimación por considerar que debió haber cometido algún error grave, por exceso, ya que no coincidía con sus convicciones religiosas.

Otro enfoque para calcular la edad de la Tierra fue la tasa de sedimentación. El movimiento del agua erosiona las rocas y el material resultante es arrastrado río abajo por la corriente. Cuando un río alcanza una zona amplia y llana, pierde velocidad y deposita el aluvión como sedimento. Este proceso ya se había observado a lo largo de la historia escrita. Así, el historiador griego Herodoto, reparó en el depósito anual dejado por el Nilo y consideró que el río debió haber necesitado muchos miles de años para construir el delta. Cientos de años después, en 1854, se descubrió una estatua de Ramsés II, del año – 1.200, enterrada bajo casi tres metros de limo fluvial, con lo que se calculó que se habían depositado unos nueve centímetros de sedimento por siglo. En el Gran Cañón, en Arizona, USA, el bloque de rocas sedimentarias que se levanta por encima del Río Colorado tiene casi un kilómetro y medio de grosor. Con la tasa de sedimentación anterior, cabría cifrar en unos dos millones de años el tiempo necesario para acumular tanto sedimento. No obstante, tal estimación representa un mínimo pues los sedimentos se compactan al quedar enterrados a gran profundidad.

En 1862, el célebre físico e inventor británico William Thompson (quien en 1892 se convirtió en Lord Kelvin) con base en datos obtenidos a partir de las velocidades de enfriamiento, calculó que la Tierra tenía una edad de cien a doscientos millones de años. Sin embargo, hace cien años, el profesor Rutherford anotó que “mientras el calor suministrado por las posibles combinaciones químicas es inadecuado para explicar el calor del Sol y la Tierra, el reciente descubrimiento de los cuerpos radiactivos, capaces de emitir una cantidad de calor un millón de veces mayor que el desarrollado en la más violenta reacción química permite concluir que no se pueden aplicar los cálculos de la edad de la Tierra, realizados por Lord Kelvin, los cuales se basan en la teoría de que la Tierra es un simple cuerpo en enfriamiento, sin que haya una generación adicional de calor”.

El descubrimiento de la radiactividad, por Henry Becquerel, en 1896, permitió establecer un método mucho mejor para calcular la edad de la Tierra y registrar edades mucho mayores que las que se habían considerado antes. Se basa en que los átomos de hidrógeno, carbono y de otros elementos químicos se pueden presentar en estados alternativos conocidos como **isótopos**. Algunos isótopos son inestables y se descomponen radiactivamente originando otra serie de elementos. Así, un isótopo de potasio presente en los minerales, gasta 1300 millones de años para que la mitad de su masa se transforme en calcio y el gas argón. Midiendo las cantidades de estos elementos presentes en una roca, los geólogos pueden calcular el tiempo transcurrido desde que se solidificó. Con base en este método, en 1953 se estimó que la edad de la Tierra es de 4600 millones de años que es la cifra admitida en la actualidad. Al nacimiento de la Tierra le siguió un largo intervalo de 4.000 millones de años, conocido como Precámbrico. Las rocas más viejas conocidas han de ser, de todas formas, más jóvenes que el propio planeta. La roca más antigua que se conoce se encuentra en Isua, al sudoeste de Groenlandia y se calcula su edad en 3.800 millones de años.

La edad deducida para la Tierra se corrobora mediante el análisis de meteoritos cuya antigüedad se extiende hasta los 4.500 millones de años; por otra parte, las rocas más viejas de la Luna se han datado en 4.600 millones de años que coincide con el tiempo en que se estima la antigüedad de nuestro planeta. Estos datos corroboran, también, que los diversos cuerpos que integran el Sistema Solar se formaron más o menos al mismo tiempo, a partir de una nube de gas que se colapsó en el espacio interestelar.

De acuerdo con la información proporcionada por las rocas sedimentarias, la Tierra ha tenido océanos líquidos desde hace al menos unos 3.800 millones de años, cuando comenzó el registro geológico. Además, la vida ha estado presente, por lo menos, durante 3.500 millones de años, lo cual demuestra que la superficie terrestre nunca ha estado completamente helada durante ese transcurso de tiempo. Si el joven planeta hubiera tenido menos nubes de las que hoy tiene hubiera reflejado al espacio menos de la radiación solar incidente sobre el planeta y éste se hubiera mantenido más caliente; alrededor de un 30 por ciento de la radiación solar que ahora llega a la cima de la atmósfera se devuelve al espacio reflejada por las nubes.

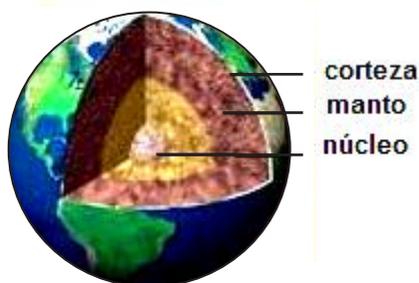
Composición de la Tierra

La nube de polvo y gas en el interior del Sistema Solar, que al colapsarse formó el planeta Tierra, estaba probablemente compuesta, sobre todo, de mezclas de silicatos, de óxidos de hierro y de óxidos de magnesio, con solo indicios de los demás elementos químicos que ahora podemos encontrar en nuestro entorno terrestre. Estos restos representan sólo una minúscula fracción del material más pesado que quedó en el Sistema Solar interior, de donde fueron desalojados los elementos más ligeros por la actividad del Sol cuando éste se estaba moldeando.

La Tierra, durante su formación, se calentó debido a tres procesos diferentes: en primer lugar, la energía cinética (energía de movimiento) de las partículas se convirtió en calor, a medida que estas partículas chocaban entre sí y se agrupaban. Esta situación prosiguió hasta mucho después de que el planeta adquiriera un tamaño respetable, cuando grandes meteoritos se estrellaron contra su superficie. Aunque este proceso aún continúa, su frecuencia es mucho menor en la actualidad. Al aumentar el tamaño del planeta, su interior debió soportar cada vez más presión por el peso creciente del material de encima. La proto-Tierra se calentó pero el calor del interior no pudo escapar con facilidad al espacio sino que quedó atrapado, en gran parte, por la sólida barrera de la corteza terrestre de encima, lo cual ayudó a que el interior de la Tierra se mantenga caliente hasta hoy.

Algunos elementos de la mezcla de materiales pesados que constituyeron el núcleo del joven planeta eran radiactivos y, desde entonces, se han ido desintegrando y con la energía generada por su fisión nuclear, han contribuido a mantener la temperatura de la Tierra. Cuando el planeta era joven, el calor radiactivo se producía en grandes cantidades pero desde entonces se han desintegrado muchísimos átomos y quedan relativamente pocos para contribuir a calentar hoy el planeta. El calor radiactivo inicial debió ser un factor importante en la fusión de la Tierra, a una profundidad de unos 400 a 800 kilómetros, en una zona rica en hierro. Los glóbulos fundidos, de este metal, se debieron hundir hacia el centro de la Tierra, a través del material más liviano que los rodeaba. A medida que se hundían debían ceder energía, en forma de calor, con lo cual todo el interior (o casi todo) debió estar en fusión. Una vez en esta fase, los elementos más pesados se debieron asentar en el interior más profundo mientras que los elementos más ligeros debieron flotar en la superficie. Así la Tierra empezó a acercarse a su estructura presente, con un interior en fusión y rico en hierro y una capa superficial constituida por material más ligero, donde predomina el silicio.

Las capas de la Tierra



*Estructura interna
de la Tierra*

La Tierra es un planeta de 6371 Km de radio, ligeramente achatado, dispuesto en capas, cada una de las cuales envuelve a las situadas más al interior.

La capa más externa de la Tierra es la **atmósfera**: es la cubierta gaseosa que rodea el cuerpo sólido del planeta. Su grosor es de unos 1.100 km, aunque la mitad de su masa se concentra en los 5.6 km más bajos.

Lo que se sabe de las demás capas es el resultado del estudio de las ondas de los terremotos que atraviesan la Tierra y que se pueden observar por medio de detectores sísmicos. Los sismólogos miden el tiempo que tardan las ondas de un terremoto en atravesar la Tierra y llegar a varios puntos diferentes de la misma y esto les indica algo de la naturaleza del material de su interior.

La envoltura exterior o **corteza** de la Tierra, constituye solo el 0.6 por ciento del volumen total del planeta y su grosor varía desde unos cinco kilómetros, debajo de los océanos, hasta 35 kilómetros por debajo de las superficies continentales llanas y 80 kilómetros debajo de las grandes cordilleras como el Himalaya. Aquellas partes de las placas que sobresalen de los océanos son los continentes.

El material de la corteza, sobre la cual vivimos, es diferente al del resto de la Tierra; contiene sólo un seis por ciento de hierro, en tanto que el planeta en conjunto contiene un 35 por ciento; un 28 por ciento de silicio, mientras que el resto del planeta contiene un 15 por ciento. Algunos elementos pesados, tales como el uranio o el torio, no se asentaron en el interior de la Tierra, debido a que se combinaron fácilmente con elementos ligeros, tales como el oxígeno o el silicio, y formaron compuestos livianos (óxidos y silicatos) que flotan en la superficie. Como consecuencia, después de la fusión inicial, se produjo una gran cantidad de calor radiactivo en las capas superficiales del planeta desde donde pudo dispersarse hacia el espacio.

A medida que la corteza se solidificó, la superficie de la Tierra se cubrió de rocas calientes y de una gran cantidad de volcanes activos que vomitaban rocas fundidas (lava) y gases. Estos gases desempeñaron un papel decisivo en la evolución subsiguiente de la superficie de nuestro planeta. Cuando la Tierra se enfrió y se solidificó aparecieron los continentes y se formaron las cuencas oceánicas.

Los continentes están constituidos por rocas ligeras, sobre todo granito, mientras que el mate-

rial de la corteza por debajo de los océanos, principalmente basalto, es algo más pesado de manera que, al final, los materiales más ligeros se elevaron más que los densos, de conformidad con las leyes más simples de la física. Las rocas más antiguas que se conocen tienen una edad de 3.800 millones de años y la edad del Sistema Solar es de unos 4.600 millones de años. Por lo tanto, tuvieron que transcurrir unos 800 millones de años para que en la Proto-Tierra se desarrollara un interior caliente y en fusión, tuviera lugar la diferenciación entre material ligero y pesado y se iniciara la solidificación de la corteza, lo cual corresponde al 13 por ciento de la historia de nuestro planeta.

Desde la corteza hasta la mitad del radio terrestre se extiende una región rocosa, en su mayor parte sólida, denominada **manto**. Este constituye más del 82 por ciento del volumen de la Tierra pero es poco lo que se sabe de su composición química.

Por debajo del manto hay un **núcleo** que consta de una parte externa líquida y una parte interna sólida. Parece que esta región está formada por hierro líquido mezclado con algo más, probablemente azufre. La densidad y la presión aumentan hacia el centro de la Tierra.

Una de las consecuencias más importantes de la existencia de un núcleo de hierro fundido es el campo magnético que produce. Al principio de la formación del Sistema Solar, el núcleo recién fundido de la Tierra debió establecer una interacción con campos magnéticos procedentes del Sol en formación. Una vez se creó así una corriente eléctrica, ésta produjo sus propios campos magnéticos. Esta característica de nuestro planeta es posible que haya desempeñado un papel muy importante en la historia de la vida y nos ha proporcionado una prueba magnética muy útil, petrificada en las rocas de la corteza, de cómo han variado las capas desde que se solidificaron hace unos 3.900 millones de años.

Las eras geológicas

La evolución abarca lapsos de tiempo muy grandes que los científicos han dividido en eras, períodos y épocas.



Estas divisiones del tiempo transcurrido entre dos o más acontecimientos geológicos o biológicos notables se utilizan para indicar en qué fecha aproximada, medida en millones de años, ocurrió una transformación sobresaliente y se utiliza, en especial, para referirse a las especies animales.

Tomado de: <https://www.google.com.co/search?q=fossil+animal+ediacariense&source>

Así, en 1946, en las colinas de Ediacara, al sur de Australia, se

encontraron los fósiles de los animales invertebrados más antiguos que se conocen; datan de hace 635 a 540 millones de años, tenían forma tubular o de hoja y aparecieron poco después de la última glaciación, cuando la Tierra se descongeló. A partir de allí comenzó la **era paleozoica** (paleozoico significa “vida antigua”) o era de los peces, que comprende el tiempo comprendido entre 540 y 250 millones de años. Al final de esta era se formó el supercontinente Pangea.

La **era mesozoica** (o intermedia) o era de los dinosaurios abarca desde 250 a 65 millones de años. Desde el punto de vista geológico, se destaca por la gran fragmentación del supercontinente Pangea, el cual, gradualmente, se dividió en un continente norte, Laurasia y un continente sur, Gondwana con apertura del océano Atlántico. Los amonites son típicos de esta época.

La era **cenozoica**, o de los mamíferos, va desde hace 65 millones de años, cuando desaparecieron los dinosaurios, hasta la actualidad.

Las placas tectónicas

Como ya mencionamos, la corteza terrestre es sólo una fina capa sobre un interior en estado de fusión. La temperatura en el centro de la Tierra, superior a la temperatura de la superficie del Sol, provoca una serie de actividades en la corteza de nuestro planeta que van desde cataclismos súbitos y violentos, como los terremotos y el vulcanismo, hasta los movimientos lentos y poderosos que llegan a aplastar extensas superficies de los continentes. En 1910, **Alfred Wegener** sugirió que la superficie de la Tierra se mueve impulsada por las fuerzas que surgen de la profundidad del subsuelo. Según él, los continentes -que hasta entonces se consideraban inmóviles- están en continuo movimiento como especies de balsas que se desplazan lentamente sobre la parte superior del manto de la Tierra. El propuso, además, que debió existir un momento, en el remoto pasado, en el cual los continentes estuvieron unidos formando un supercontinente que Wagener bautizó con el nombre de *Pangea* (de *pan*, todo y *gea*, tierra). La unión de los continentes implicaba que también los océanos estaban también reunidos en un inmenso mar que denominó *Panthalasa* (todos los mares).



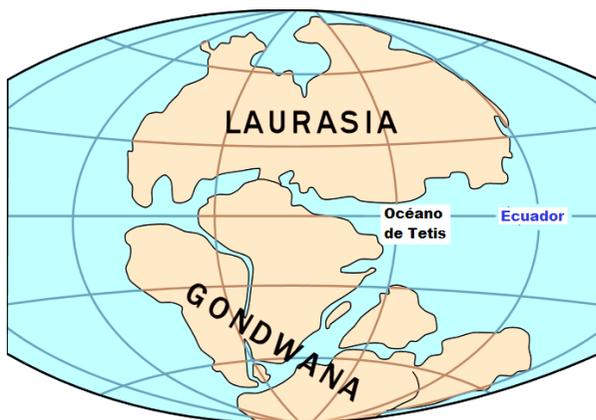
Pangea, hace 250 millones de años

Como ha sucedido en otras ocasiones, la teoría de Wager se recibió inicialmente con escepticismo; sin embargo, nuevos descubrimientos confirmaron, que estos movimientos, denominados tectónica de placas, ocasionan que los continentes choquen y formen nuevos continentes de mayor extensión.

En el presente, América del Sur se aleja de África, a una velocidad de unos dos centímetros por año; además, el Océano Atlántico se extiende en detrimento del Pacífico que cada vez disminuye en algo su superficie.

La historia de la Tierra aporta pruebas de que, en varias ocasiones, en su corteza se formaron supercontinentes que luego se subdividieron en varios continentes menores que, de nuevo, se volvieron a juntar en un supercontinente.

Hace unos 180 millones de años, Pangea comenzo a romperse en dos grandes continentes, Laurasia y Gondwana que, posteriormente, se redistribuyeron hasta llegar a la configuración actual.



Laurasia y Gondwana

El efecto más espectacular fue el gran desplazamiento de la placa que hoy forma India. De su posición primitiva, en el extremo sur, realizó un viaje de miles de kilómetros en menos de cien millones de años hasta chocar con el continente asiático. Como consecuencia del impacto, se formó la gran cadena montañosa del Himalaya. Australia también realizó un desplazamiento importante: desde su posición inicial, hace 200

millones de años, muy al sur y en contacto con el continente antártico, se desplazó durante el cenozoico rumbo al norte, hasta el ecuador.

Las direcciones y las magnitudes de los movimientos actuales se conservarán constantes durante unos 50 millones de años más. La Antártica, Africa y la placa eurasiática permanecerán fijas. La parte este de Africa se convertirá en un mar. El estrecho de Gibraltar se cerrará y el Mediterráneo terminará secándose. Las tres Américas continuarán su desplazamiento hacia el oeste lo que ampliará de modo considerable el océano Atlántico. América del Norte se separará de la del Sur (nunca han sido muy unidas), lo cual borrará del mapa a Panamá y sus vecinos.

Futuro de la Tierra

El futuro del planeta Tierra vendrá determinado por diversos factores, tales como el incremento de la luminosidad proveniente del Sol, la pérdida de energía calorífica del núcleo de la Tierra, perturbaciones originadas por otros cuerpos del Sistema Solar y variaciones a nivel bioquímico de la superficie de la Tierra. La teoría de Milankovitch predice que el planeta seguirá sufriendo ciclos de glaciaciones a causa de la excentricidad de su órbita, la oblicuidad de la eclíptica y la precesión del planeta. La tectónica de placas dará lugar probablemente a un nuevo supercontinente dentro de unos 250-350 millones de años.

Dentro de unos 1.000 a 2.000 millones de años, la radiación solar se incrementará debido a la acumulación de helio en el núcleo del Sol, lo que conllevará la pérdida de los océanos y el cese de la deriva continental. Este proceso proseguirá acentuándose hasta los 4.000 millones de años, en el futuro, cuando el incremento de temperatura en la superficie terrestre causará un efecto invernadero descontrolado. En este punto, la mayoría de la vida en la Tierra, si no toda, se habrá extinguido. Finalmente, el destino último más probable del planeta será la absorción por parte del Sol, en unos 5 500 millones de años, después de que esta estrella entre en una fase de gigante roja y se expanda más allá de la órbita de la Tierra.

La teoría de la evolución no es una teoría sino un conocimiento seguro, lo más seguro que puede ser un conocimiento adquirido por el hombre”.

KONRAD LORENZ (Nobel de Medicina, 1973)

6. La idea de la evolución

Aunque Darwin no menciona el término **evolución** en ninguno de sus escritos es claro que a él se le atribuye la paternidad de este concepto biológico que hoy se aplica en todos los campos de la ciencia. Entre los biólogos que hicieron algunos aportes, buenos o discutibles al respecto, se encuentran Linneo, Cuvier y Lamarck.

En 1707 nació en una región rural de Suecia, Karl von Linné, más conocido como Linneo, quien, desde pequeño, inició el estudio de la botánica, en el jardín de su casa natal. En 1735, mientras estudiaba Medicina en la Universidad de Upsala, escribió su obra principal *Systema naturae* (Sistema de la naturaleza) donde intentó clasificar todos los seres vivos en reino, clase, orden, género y especie e ideó la nomenclatura de las especies animales y vegetales utilizando para ello dos términos latinos: El primero de ellos hace referencia al género y se escribe la inicial con mayúscula; designa un conjunto de especies relacionadas entre sí más estrechamente que con otras; el segundo de los nombres latinos es el indicativo de la especie concreta. Así, el hombre actual es del género *Homo* y la especie *sapiens*.

La intención de Linneo era descifrar el orden y la taxonomía del paraíso que Dios había creado en la Tierra. Por tal razón, las distintas especies aparecían como algo definitivo y acabado –así se habían creado desde el comienzo- Un perro era completamente distinto de un lobo y un tigre de un león.

Buffon, naturalista francés, nació en 1707, dentro de una familia de ricos y altos funcionarios. Tras estudiar en el colegio de jesuitas de Dijon, se licenció en Derecho en 1726 pero prefirió las ciencias y, para descontento de su familia, se dedicó a estudiar matemáticas y botánica, leyó a Newton y siguió algunos cursos de Medicina. Con sólo 27 años fue escogido miembro de la Academia de Ciencias Francesa y luego Guardián de los Jardines Reales. A los 32 años comenzó su monumental obra, *Historia Natural*, de 44 volúmenes que continuó escribiendo hasta su muerte, 49 años después (mientras tanto, se le concedió el título de conde). En esta obra habla de las transformaciones sucesivas de la materia inanimada y viviente.

En su obra, Buffon rechaza la objetividad de la sistemática, especialmente la linneana, a la que considera totalmente artificial. Propone un concepto de especie muy próximo al concepto biológico moderno, fundamentado en la permanencia de los caracteres a lo largo de las generaciones y en la imposibilidad de obtener descendientes fecundos entre dos especies diferentes. Buffon reconoció que las especies experimentan variaciones.

El transformismo de Buffon se limitó al interior de las especies. Si bien Buffon especuló sobre la posibilidad de un tipo original de donde habrían descendido el resto de los animales, mediante transformaciones morfológicas, finalmente rechazó esta hipótesis basándose en la constancia de las especies y la infertilidad de los híbridos.

Su enfoque influyó en la *Enciclopedia* de Diderot y sus ideas también lo hicieron sobre las siguientes generaciones de naturalistas: Lamark, Cuvier y Darwin.

Cuvier nació en París en 1769. Fue un naturalista promotor de la Anatomía comparada y la Paleontología. A los 27 años fue nombrado suplente de la cátedra de Anatomía del Museo de París y profesor del colegio de Francia. Por la misma época presentó a la Academia de Ciencias una memoria donde hablaba de **las especies extinguidas**.

George Cuvier investigó la permanencia de las grandes funciones fisiológicas en la diversidad de las especies y fue el primer naturalista en clasificar el reino animal desde el punto de vista estructural o morfológico que, no obstante, estaba completamente subordinado a la función. Defendió el principio según el cual y con base en los datos proporcionados por la anatomía comparada, los animales se debían agrupar en cuatro **planes estructurales de organización**: vertebrados, moluscos, articulados y radiados. Cada uno de estos grupos se definía por una disposición particular de los sistemas esenciales. Este “principio de correlación” actuaba como hilo conductor tanto de la anatomía comparada como de la paleontología. Gracias a este principio fue capaz de reconstruir los esqueletos completos de animales fósiles.

Partiendo de sus observaciones paleontológicas, Cuvier concibió la historia geológica de la Tierra fundamentada en períodos de estabilidad y de revoluciones o catástrofes. En tales períodos se habría producido la extinción de las especies hasta entonces existentes y la sustitución por otras. Estas nuevas especies procederían de otras regiones del planeta que se habrían salvado de la catástrofe.

Jean Baptiste **Lamarck** nació en 1744, en una pequeña aldea de Picardía, en el seno de una familia noble pero de recursos económicos limitados.

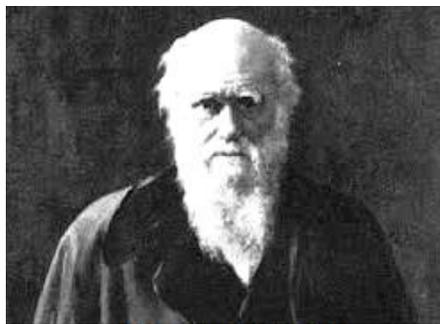
Aficionado a la botánica, recogió sus observaciones en un estudio científico que fue publicado en 1779 por Buffon, con el título de “Flora Francesa”. Buffon también influyó para que Lamarck fuera admitido en la Real Academia de Ciencias de París. En 1783 publicó la “Enciclopedia botánica” una de las aportaciones decisivas en ese campo.

En 1789, Lamarck fue nombrado el “más famoso Guardián de los herbarios del gabinete del rey”. Cuando llegó la revolución francesa, Lamarck pidió que el Jardín del Rey se convirtiera en una institución científica al servicio del pueblo. Su petición fue aceptada y, en 1793, se creó el Museo Nacional de Historia Natural, dotado con doce cátedras, una de las cuales –la dedicada a insectos y gusanos- fue ocupada por Lamarck. De su estudio determinó la existencia de un nuevo grupo de animales que se caracterizaban por carecer de columna vertebral. A este grupo lo denominó invertebrados. Con casi 50 años de edad, debió dedicarse a estudiarlos para poderlos enseñar.

Las investigaciones de Lamarck abarcaron campos muy variados pero quizás lo más conocido son sus aportes sobre la evolución, expuestos en su Filosofía Zoológica, que contiene dos conceptos fundamentales: la ley del uso y el desuso o la función hace al órgano y la ley de la herencia de los caracteres adquiridos.

La primera sostiene que si una parte del cuerpo se usa de manera continua, este uso determina su crecimiento y desarrollo. De la misma forma, los órganos que no se emplean, se debilitan, se atrofian y puede ocurrir que las sucesivas adaptaciones que tienen lugar en el transcurso de la evolución determinen su desaparición. El segundo postulado afirma que cualquier animal puede transmitir a sus descendientes aquellos caracteres que ha adquirido a lo largo de su vida. Estas teorías, revolucionarias para su tiempo, no fueron acogidas por sus contemporáneos y pasaron prácticamente desapercibidas.

Tras una vida consagrada al estudio de los secretos de la naturaleza, Lamarck murió en París, a los 85 años, pobre y olvidado.

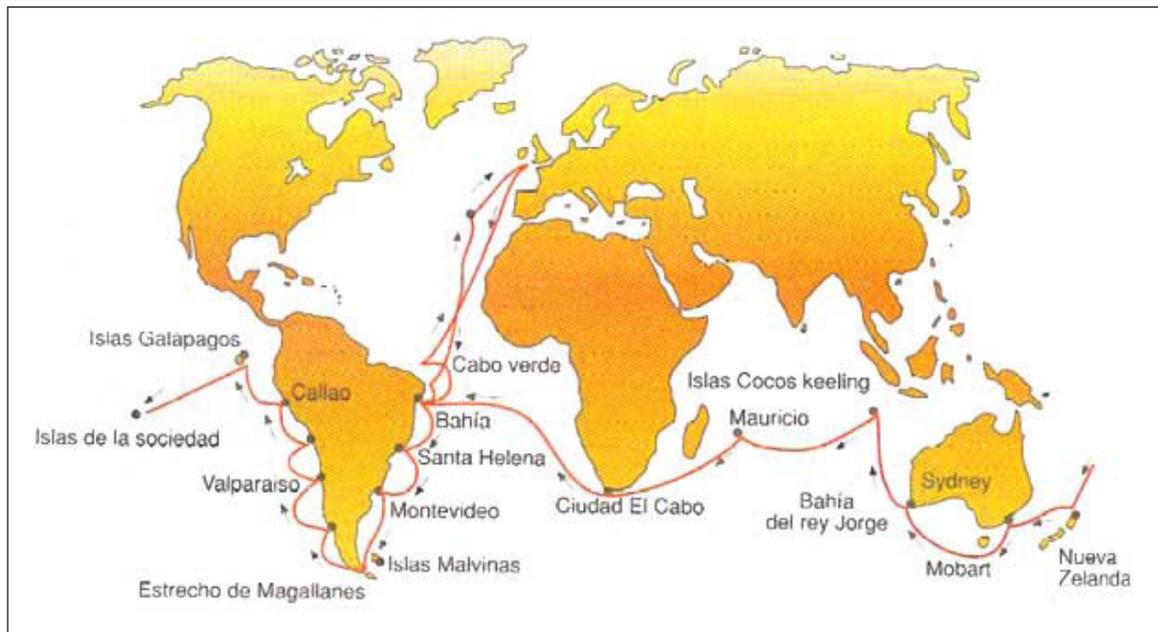


Charles Darwin

Charles Darwin

El naturalista más famoso de todos los tiempos nació en Shrewsbury, Inglaterra, en 1809. Posteriormente, en Cambridge, Darwin culminó sus estudios de teología. Allí conoció a John Henslow, un sacerdote de la iglesia anglicana y profesor de Botánica. Henslow, además de afianzarle la afición por la naturaleza, le facilitó a Darwin la oportunidad de su

vida: utilizó sus influencias para lograr que el joven Charles, de 22 años, pudiera ir en el velero *Beagle* a hacer un recorrido científico por el mundo, con el propósito de encontrar pruebas que demostraran la creación como la proponía la Biblia. El viaje comenzó el 27 de diciembre de 1809, duró casi cinco años y, posteriormente, Darwin lo calificó como el acontecimiento más importante de su vida.



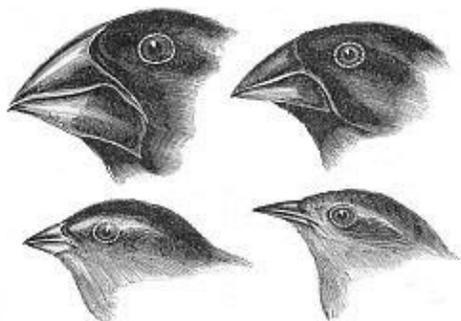
Recorrido de Darwin en el velero Beagle

En 1832, la expedición llegó a Brasil. Durante su estancia en Rio de Janeiro pasó varias semanas recogiendo conchas marinas y coralinas, en las costas de Botafogo, así como plantas, arañas y escarabajos, en los bosques de Corcovado.

En enero de 1833, el *Beagle* arribó a Tierra del Fuego. Uno de los objetivos de esta escala era devolver, a su tierra de origen, a tres nativos que se habían convertido al cristianismo y que se encontraban a bordo de la expedición, para que convirtieran a algunos de sus congéneres. Este experimento de reeducación occidental fue un completo fracaso.

En Argentina recogió gran número de huesos fósiles, de cuyo estudio concluyó que los grandes animales del pasado habían vivido en una sabana abierta y no en el denso bosque tropical que se observaba en ese momento. También, en esta región exhumó esqueletos de armadillos gigantes, de lo que dedujo que eran especies extinguidas pero ascendientes de las especies actuales.

Como resultado de una posible infección por el insecto *Triatoma infestans* cayó gravemente enfermo. Tras su recuperación y ya en las islas Galápagos encontró una variada fauna de tortugas (una de ellas, que se encontraba en un zoológico australiano y que estampaba en su coraza la firma de Darwin, murió hace pocos años). Hay seis islas y en cada una vivía una especie distinta de tortuga gigante. Darwin encontró que tenían rasgos comunes como si descendieran de un antecesor común. La distinción entre las distintas clases de tortugas probó a Darwin que las especies no son inmutables, sino que cambian, evolucionan. Lo mismo observó en algunos pájaros –pinzones- de las mismas islas.



Características distintas de los picos de los pájaros pinzones que Darwin observó en las Islas Galapagos en 1835

Las diversas especies de pinzones estaban adaptadas a los ambientes de las distintas islas: picos esbeltos para capturar insectos y beber néctar, picos gruesos y poderosos para abrir frutas y partir nueces, picos curvados y picos rectos.

Unos años después de su vuelta, cuando Darwin tenía 30 años de edad, se casó con su prima Emma, y se dedicó al estudio y la investigación y a producir libros ... e hijos.

En el ambiente apacible de Downe fueron pasando los años y Darwin maduró, poco a poco, su teoría de la evolución sin que se decidiera a publicarla, tal vez por respeto a su esposa Emma, de fuertes convicciones religiosas. Apareció entonces en escena un naturalista de origen muy modesto, Alfred Russell Wallace.

Con grandes sacrificios, Wallace remontó el río Amazonas y luego el Vaupés hasta lo que hoy es Mitú, en Colombia; más tarde remontó también el Río Negro, hasta la piedra del Cocuy, en el límite entre Colombia, Brasil y Venezuela. Con base en la flora y la fauna que observó en sus viajes, formuló por su cuenta, y de manera totalmente independiente de Darwin, la teoría de la evolución por selección natural y la lucha por la existencia. En 1855 publicó un artículo afirmando el parentesco entre las especies actuales y las más antiguas, ya extinguidas. Empezó, entonces, una correspondencia entre Darwin y Wallace. En 1858 Wallace envió a Darwin el manuscrito de un segundo artículo para que le diera su opinión. Darwin se aterró al comprobar que allí estaban, resumidas, las ideas en las que él venía trabajando desde hacía 20 años. Si aquel artículo salía antes que el libro, la prioridad científica del descubrimiento le correspondería a Wallace.

Pero Wallace, además de un gran científico, era una excelente persona. Por arreglos del geólogo Lyell, amigo de Darwin, se logró que se publicaran juntos el artículo de Wallace y un resumen de las ideas de Darwin. Con esto, Darwin no pudo posponer por más tiempo su obra, siempre en proyecto. Después de trece meses de arduo trabajo apareció *El origen de las especies por selección natural*, la obra más importante de las Ciencias Naturales en el siglo XIX. El 24 de noviembre de 1859 salió su libro para la venta al público. La primera edición del libro, de 1250 ejemplares, se agotó a las pocas horas. La segunda, de 3.000 ejemplares, se vendió en los días siguientes.

¡A partir de entonces el mundo ya no fue el mismo!

La idea de que, desde un principio, los seres vivos fueron creados tal como los vemos ahora, se fue derrumbando poco a poco. La sugerencia de que el hombre no estaba hecho a imagen y semejanza de Dios, sino que era el resultado del azar y que descendía de los primates y de seres inferiores era algo muy difícil de asimilar para la mentalidad del siglo XIX (y aún hoy!).

Si creemos que los seres vivos no han cambiado desde que fueron creados no hay forma de explicar el gran número de fósiles de plantas y animales que se conocen y de los cuales constantemente se descubren más. Muchos de estos corresponden a especies que ya no existen. ¿Qué sentido tiene que un Creador haya engendrado en un comienzo determinadas especies para destruirlas después? Por el contrario, lo que se ha descubierto con las modernas técnicas de datación es que las especies van cambiando gradualmente a través de millones de años; hay una transición de una forma a la siguiente.

Por otro lado, solo pensando en un Creador jugueteón, cuyo único interés fuera divertirse, se podría entender por qué inventó tantas razas de perros y tantas clases de insectos o tantas variedades de moscas; ¿no era suficiente con una sola clase de cada especie? O por qué los distribuyó tan desigual: en algunos sitios, por ejemplo, en los bosques tropicales, en un kilómetro cuadrado se encuentran muchas variedades distintas de la misma especie y, en otras zonas geográficas pueden pasar kilómetros y kilómetros sin encontrar siquiera un ejemplar de una determinada especie.

Los organismos son tremendamente diversos en su estructura, tamaño, forma y manera de vivir. Se han descrito cerca de medio millón de especies de plantas y millón y medio de especies animales y cada día se descubren más. Los hay que son capaces de vivir en varios ambientes distintos, mientras que otros presentan una extraña especialización. Para los científicos, la única explicación posible a la enorme diversidad orgánica es que se ha producido como respuesta a la diversidad de ambientes en nuestro planeta, en un proceso que demandó millones de años.

Pocas ideas científicas han cambiado tanto el mundo como la teoría de la evolución de las especies. Probablemente provocó una conmoción mayor que la teoría heliocéntrica. Esta teoría sacudió los cimientos no solo de la ciencia, sino de la filosofía, la religión, la política y la sociedad misma. La civilización occidental, que a mediados del siglo XIX dominaba el mundo, se basaba en las *Sagradas Escrituras* que, en el capítulo del Génesis, hablan de un Dios que creó el universo en seis días y descansó en el séptimo (y todavía no ha vuelto, dicen algunos). Aún para las mentes más progresistas de su tiempo (que no tomaban la Biblia al pie de la letra, sino como una metáfora), resultaba imposible que los seres vivos hubieran evolucionado de un ancestro común, porque hacia 1860 los cálculos señalaban que la Tierra tenía entre 20 y 100 millones de años de antigüedad, un tiempo demasiado corto para que la vida hubiera evolucionado según los postulados de Darwin. Fue necesario que el físico francés Henri Becquerel descubriera la radioactividad en 1896 para que cálculos posteriores establecieran que la edad de la Tierra es de 4.600 millones de años.

En 1871 Darwin publicó un nuevo libro, *La descendencia humana*, en el cual afirmaba que también los seres humanos descendían de formas inferiores, en este caso de primates simios, cuyos antepasados debían clasificarse dentro del grupo de los monos del Viejo Mundo. Es decir, que el hombre también era el resultado de la evolución. Aún más, se atrevió a aseverar que el hombre debía tener su origen en África. Para Darwin, el hombre era una especie más y, como tal, sujeta al mismo proceso de evolución que las demás especies. Naturalmente sus ideas provocaron gran controversia en su tiempo y, aún hoy, la siguen generando.

El hecho de la evolución

Los astrónomos y físicos ya habían contradicho la creencia muy antigua de que la Tierra era el centro del Universo. De acuerdo con ellos, la Tierra es un planeta más del Sistema Solar, sin nada especial, fuera de que hay vida en él y una gran cantidad de agua líquida. Y el Sol, el centro de nuestro sistema solar, es una estrella más, entre los 100.000 millones de estrellas que pueblan la Vía Láctea. Y la Vía Láctea, nuestra galaxia, es una más entre millones que se han detectado en el Universo. De modo que lo único especial que tiene la Tierra es que constituye nuestro hogar.

Los naturalistas, por su parte, bajaron al hombre del pedestal en que se había mantenido por siglos. Demostraron que no es el rey de la creación sino una criatura más, como muchas de las que vemos a diario, que pudo haberse extinguido o, simplemente, no haber existido. Según la teoría de Darwin, solo el azar, encausado por las fuerzas del ambiente, ha sido el causante de los cambios biológicos.

Las pruebas que existen hoy a favor de la evolución son muy abundantes y contundentes de modo que ésta se ha convertido en un hecho incontrovertible. Es más, en la actualidad no es posible entender la Biología, como disciplina, si no se parte del hecho de que las especies que vemos hoy en día descienden de otras especies hasta llegar a un antepasado común a todas ellas.

Extensión de la idea de evolución

La idea que, en un principio, se utilizó solo en el terreno biológico, se extendió a los demás campos del saber de tal manera que, en la actualidad, se considera que no solo el hombre y los seres vivos, en general, han evolucionado a lo largo de extensos períodos de tiempo sino que también lo han hecho la Tierra y las estrellas y el Universo en su totalidad. Lo que vemos en el presente es el resultado de una serie de transformaciones que no estuvieron programadas ni ordenadas de antemano; una historia de un cambio gradual y continuo que comenzó hace unos 13.800 millones de años, moldeada por procesos naturales que solo obedecen a las leyes físicas y químicas.

Las transformaciones siempre van desde lo simple inicial hacia lo complejo y diverso. Los niveles superiores de organización de la vida surgieron de los inferiores. De la nada surgió el Universo en forma de una inconmensurable energía que parcialmente se transformó en materia; de la materia inorgánica se pasó a la orgánica y de esta a la vida; la vida inicial, rudimentaria, originó las primeras células cuya asociación dio origen, a su vez, a las primeras especies de las cuales, mediante un proceso muy intrincado y ramificado, no lineal ni directo, se derivaron otras especies. Muchas de ellas, la gran mayoría, desaparecieron. Nosotros somos producto de las especies que sobrevivieron. De modo que el hombre es el resultado de una serie de circunstancias afortunadas.

La vida es un proceso químico

C. DE DUVE (Nobel de Medicina 1974)

La vida no se inicia; la vida se transmite, se continúa

R. EDWARDS (Nobel de Medicina, 2010)

7. Surgimiento de la vida

Cuándo apareció la vida?



Estromatolitos: Fossilización de colonias bacterianas

En Isua y en Akilia, en Groenlandia, se encontraron unas rocas de hace 3.800 millones de años, denominadas **estromatolitos**. Estas rocas se formaron por la fosilización de inmensas colonias bacteriales, en capas superpuestas; cada capa corresponde a una especie bacterial diferente. La capa superior pertenece a organismos que utilizaban la luz solar para fabricar sus propios constituyentes; es decir, eran fotosintéticos. Cuando morían, su sustancia servía de alimento a las capas inferiores.

Lo anterior indica que solo unos 800 millones de años después de haberse formado la Tierra (hace unos 4.600 millones de años), ya se había instalado la vida sobre su superficie. No solo es extraordinario que la vida haya aparecido, quizás, en unas pocas decenas de millones de años, sino que lo hubiera hecho en un ambiente tan inhóspito, con un bombardeo intenso de cometas y meteoros, fuerte vulcanismo, abundantes aguas termales, sin oxígeno y expuesta a letales radiaciones solares.

Características de los seres vivos

El mundo vivo es muy complejo y muy diverso para tratar de definirlo. Es más fácil mencionar algunas de sus características:

- Los seres vivos obedecen a las mismas leyes físicas y químicas que rigen para el resto del Universo.
- Todos los organismos contienen, proporcionalmente, bastante agua (del 50 al 95 por ciento de su peso) y macromoléculas orgánicas, con formas tridimensionales complicadas: proteínas, ácidos nucleicos (ADN y ARN), carbohidratos y lípidos.
- Todos los seres vivos actuales están constituidos por estructuras muy pequeñas, las células, aunque es posible que las primeras formas de vida se desarrollaran sin ser todavía células.
- Los seres vivos también se reproducen; copian en los hijos las características de los padres.

Para explicar el origen de la vida se debe, entonces, por una parte, intentar descifrar, basándose en las leyes químicas y físicas ya establecidas, cómo aparecieron inicialmente los componentes más pequeños y, a partir de estos, las macromoléculas de la vida; por otra parte, cómo surgieron los procesos comunes de la reproducción y el metabolismo.

La célula

Todos los seres vivos están constituidos por células; su número varía con cada clase de organismo y pueden ir desde una sola, como en el caso de las bacterias, hasta billones de células, como en el caso de las ballenas; en las bacterias, la misma célula desarrolla todas las funciones; en los demás organismos, para cada función –reproducción, protección, transporte, reconocimiento, digestión, movimiento y un largo etcétera- se requiere un tipo de célula especial. Los virus son un caso aparte: no son células pero se reproducen –una característica básica de los seres vivos- en presencia de una célula adecuada.

Las células toman alimento de su entorno y lo transforman. Lo convierten en otras sustancias que la célula necesita o lo utilizan como fuente de energía, necesaria, por ejemplo, para multiplicarse o transformarse. Esto es lo que se conoce como metabolismo.

Las células se diferencian bastante, de acuerdo a su estructura y función, pero conservan una arquitectura básica: todas están rodeadas por una membrana que protege los componentes internos y controla el paso de sustancias entre el interior y el exterior de la célula. Independientemente del organismo, las células nuevas se originan únicamente por la división

de las ya existentes. Todas estas características comunes y otras varias, sugiere que todos los organismos que hoy conocemos, proceden de un antepasado común, que ya contaba con las moléculas fundamentales y disponía del mecanismo bioquímico básico para sostener la vida. El problema, entonces, es encontrar cómo se formó la primera célula.

El agua

El constituyente que se encuentra en mayor proporción en los seres vivos, es el agua líquida lo cual sugiere que es muy probable que la vida haya comenzado en el agua. Esto se ve corroborado porque las proporciones de sodio, potasio y cloro en nuestros tejidos son semejantes a las que se encuentran en todos los océanos.

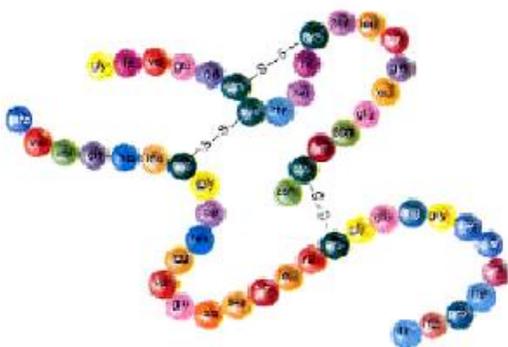
La Tierra es singular entre los planetas de nuestro sistema solar debido, principalmente, a sus enormes océanos. El agua se produjo, durante miles de millones de años, por las interacciones, a temperatura elevada, entre los hidrocarburos atmosféricos y los silicatos y óxidos de hierro del manto terráqueo. La humedad alcanzó la superficie del planeta, como vapor de agua, durante las erupciones volcánicas. Los océanos se formaron al condensarse el vapor y volver de nuevo a la Tierra en forma de lluvia. Se considera que la primera lluvia pudo haber durado más de 60.000 años.

El agua tiene muchas propiedades que la hacen especialmente adecuada para la vida. Una, es su reconocida capacidad de disolver muchas sustancias lo cual permite que esas sustancias puedan ser transportadas y asimiladas por los seres vivos. Pensemos en lo incómodo –y a veces peligroso- que es tragarnos algo sólido. Cuando un alimento llega a la boca comienza a disolverse en la saliva, que es casi totalmente agua, y en esta forma se transporta al resto del sistema digestivo.

Por otro lado, si mezclamos dos sustancias sólidas sólo excepcionalmente reaccionan entre sí pero si, previamente, las disolvemos en agua, es mucho más fácil que se presente la reacción. Y el agua, a diferencia de cualquier otro solvente, es líquida en un amplio rango de temperaturas: cien grados (de 0 °C a 100 °C). Esto le da una estabilidad única y permite variaciones ambientales de temperatura sin que se sienta su efecto de manera notable. Al agua hay que suministrarle o quitarle mucho calor para que su temperatura cambie lo cual ayuda a mantener estable la temperatura corporal de los seres vivos.

Las proteínas

Las proteínas son constituyentes esenciales de todos los organismos. La diversidad de funciones que pueden realizar es asombrosa. Por ejemplo, en los animales, las proteínas son los componentes estructurales principales de la piel, el músculo, el tejido conjuntivo, las plumas, las uñas y el pelo. Además de servir como materiales estructurales en todos los seres vivos, las proteínas participan en funciones tan diversas como la regulación metabólica, el transporte, la defensa y la catálisis. Esa diversidad funcional está relacionada con las múltiples posibilidades de combinación de sus unidades componentes, los aminoácidos (las letras de las proteínas) de los cuales hay 20 diferentes.



Estructura de una proteína pequeña, la insulina, encargada de controlar el nivel de azúcar en la sangre; está constituida por 51 aminoácidos. Como solo hay 20 aminoácidos distintos (20 letras), necesariamente algunos de ellos se repiten.

En la transformación de los alimentos, las células utilizan unas proteínas especiales, denominadas enzimas, que son tremendamente eficientes porque (1) son muy específicas: hay una enzima determinada para cada reacción que se realiza en el organismo –se calcula que en el organismo humano se deben realizar entre 60.000 y 80.000 reacciones diferentes- por lo cual solo se produce una sustancia específica, en el momento que corresponde, y (2) son muy veloces: las transformaciones ocurren en fracción de segundos.

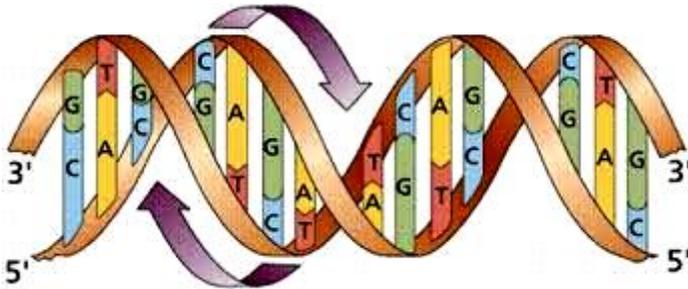
Sin las enzimas no sería posible la vida porque un organismo no podría esperar mucho tiempo para que se produjera una transformación, dentro de su organismo, o no podría soportar que se produjeran compuestos diferentes a los que requiere un organismo en un momento dado.

Los ácidos nucleicos.

Hay hechos tan comunes en la naturaleza que no nos causan ninguna admiración: a partir de una planta de rosa solo se obtienen otras plantas de rosa, no de trigo o de papa. Por otro lado, los hijos siempre se parecen a los padres lo que implica que debe haber algo en la naturaleza – una información, un código, un mensaje- que, de alguna manera, se transmite de padres a hijos. Ese algo ya se ha identificado: es el **ADN**, una molécula muy grande, la más grande presente en cualquier organismo, que se encarga de transmitir la información genética, es decir, los caracteres hereditarios que permitan conservar la especie.

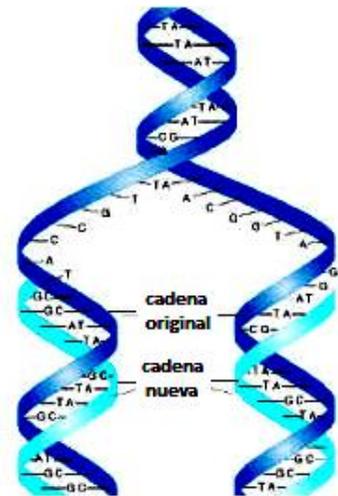
En 1953, Watson y Crick descifraron la estructura del ADN. Ellos encontraron que el ADN está formado por una doble cadena muy larga en que se alternan solo cuatro letras denominadas nucleótidos: A (de Adenina), T (de Timina), C (de Citosina) y G (de Guanina).

Estructura del ADN



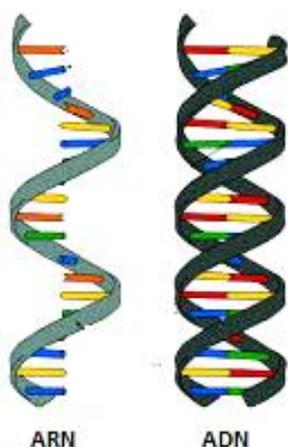
Las dos cadenas del ADN son complementarias: siempre, frente a T, en una cadena, se encuentra A, en la cadena complementaria (o viceversa: frente a A se encuentra T) y frente a C se encuentra G (o viceversa).

Replicación del ADN. A partir de una molécula de ADN se forman dos, en donde cada cadena original sirve de molde para una cadena nueva; el orden inicial de los nucleótidos siempre se conserva, de acuerdo a la regla básica: frente a T se encuentra A (o viceversa) y frente a C se encuentra G (o viceversa). Las dos cadenas avanzan en sentido contrario.



Interrelación entre los ácidos nucleicos y las proteínas

En las células vivas, el ADN y las proteínas son dos sistemas engranados que se complementan mutuamente: para la síntesis de una proteína se necesita un segmento de ADN que indique el orden en que deben ir los aminoácidos. Pero para la síntesis del ADN se necesitan unas proteínas especiales, denominadas enzimas, que permitan que se realicen las reacciones correspondientes, con lo cual se llega al problema tradicional de qué fue primero: el huevo o la gallina? O, trasladado a nuestro caso, el ADN o las proteínas? Resulta muy improbable que las proteínas y los ácidos nucleicos, dotados unas y otros de estructuras complejas, aparecieran espontáneamente en el mismo lugar y al mismo tiempo.



Para resolver el problema, entra en escena un intermediario entre el ADN y las proteínas; es el **ARN** (Acido RiboNucleico): ADN → ARN → proteínas. Por la forma en que actúa parece que fue el antecesor de ambos. El ARN sería el sistema autorreproductor más simple posible y, como tal, se podría considerar el primer ser vivo. Y tiene la ventaja de que es mucho más sencillo (una sola cadena en lugar de las dos del ADN) y más fácil de sintetizar que el ADN.

Dos investigadores americanos, Cech y Altman, premios Nobel en 1991, encontraron, cada uno por su lado, que ciertas moléculas de ARN podrían haber realizado la función catalítica que hoy cumplen las proteínas. Es decir, en una época temprana de la vida, las moléculas de ARN pudieron haber servido simultáneamente como aceleradores de reacciones y como fuente de información para construir réplicas de sí mismas. Si esto fue así, ¿qué necesidad había, entonces, del ADN y de las proteínas?

Tanto el ADN como las proteínas son más estables que el ARN. Además, las proteínas, por contar con un alfabeto de veinte letras (los aminoácidos) pueden disponer de más especificidad para catalizar el número tan amplio de reacciones diferentes que ocurren en los seres vivos. El problema es que el ARN es una sustancia que se descompone fácilmente en el plazo de unas horas. Si los primeros organismos se hubieran arriesgado a vivir en algún lugar caliente o si hubieran intentado crecer demasiado, se hubieran enfrentado a un rápido deterioro de sus genes. Algún organismo inventó, a fuerza de errores, una versión nueva y más resistente de ARN llamada ADN y un sistema para hacer copias del ARN a partir del ADN. Debía trabajar de prisa y con precisión. Tenía que unir copias genéticas de tres letras a la vez. Cada grupo de tres letras (o nucleótidos) venía señalado con una etiqueta de aminoácido. Mucho después, las etiquetas de aminoácidos se unieron para formar las proteínas y la palabra de tres letras (nucleótidos) se convirtió en el código genético, el código para la fabricación de proteínas.

Por qué el código de tres letras?

Los aminoácidos son los constituyentes de las proteínas. Y hay 20 aminoácidos distintos (20 letras).

Los nucleótidos son los constituyentes del ADN y el ARN. Hay cuatro nucleótidos distintos: A, T, C y G (cuatro letras).

Las cuatro letras del ADN son insuficientes para indicar, con certeza, cuál de los 20 aminoácidos debe ir en una determinada posición. Si se mezclan las cuatro letras del ADN entre sí (AA, AT, AC, CA, GC, etc.) hay 16 posibilidades que todavía son insuficientes para indicar cuál de los 20 aminoácidos debe ir en una determinada posición. La solución es combinar tres nucleótidos (AAA, GCA, ATA, GCC, etc) con lo cual se presentan 64 posibilidades que son más que suficientes para codificar 20 aminoácidos.

Las membranas

Todas las células actuales están rodeadas por una fina película llamada membrana la cual define los límites de la célula, la separa de su ambiente e impide que sus componentes interiores se disuelvan fácilmente en el medio externo; la membrana sólo permite el paso de algunas sustancias hacia adentro o hacia afuera de la célula. Pero las sustancias ubicadas en el interior de la célula están más concentradas lo cual facilita que se encuentren y reaccionen entre sí. Muchos científicos creen que la aparición de la membrana fue el acontecimiento clave para la aparición de la vida y han realizado experimentos exitosos para demostrar que la formación de las membranas primitivas no debió ser algo muy complicado.

Por el contrario, otros científicos creen que la formación de la membrana fue una etapa posterior a la aparición de la vida. Argumentan que una membrana pudo representar, en un comienzo, un impedimento para la libre circulación de sustancias de la “sopa primitiva”. Esta sopa no necesariamente debía llenar todos los océanos sino que las zonas costeras, lagunas, estanques y aún charcos, pudieron constituir lugares ideales para que la sopa espesara más, evolucionara químicamente y llegara a producir las primeras moléculas precursoras de la vida. Resulta sugestivo que algunos sistemas metabólicos considerados muy antiguos, como la fermentación, se realicen en una parte de la célula –el citoplasma- que no tiene una estructura especial.

Los constituyentes químicos principales de las membranas actuales son los fosfolípidos que tienen una estructura algo compleja y, por tanto, se debieron formar en una etapa más avanzada, probablemente cuando apareció la maquinaria del ARN para sintetizar proteínas. Gran parte de la estructura de los fosfolípidos está constituida por cadenas largas de carbono e hidrogeno, similares a las de los hidrocarburos. Probablemente, los asteroides y aerolitos trajeron a la Tierra mucho metano (el hidrocarburo más sencillo) helado que, tras disolverse en los mares, fue atacado por los rayos ultravioleta y se transformó en una inmensa capa de hidrocarburos cuyo representante principal actual es el petróleo. Estos hidrocarburos, a su vez, fueron atacados por la radiación solar y parcialmente se solubilizaron y oxidaron.

Primeras biomoléculas

Se supone que antes de que apareciera cualquier tipo de organismo hubo una “evolución química” que produjo un conjunto básico de tipos de moléculas con el que se elaboran los organismos actuales, a saber: aminoácidos, azúcares, bases nitrogenadas y lípidos.

El hecho de que todas las macromoléculas biológicas, en todos los organismos, estén hechas de los mismos materiales –unas tres docenas de moléculas más pequeñas- es un indicio fuerte de que los organismos actuales descienden de un ancestro común o de una sola clase de célula. Debido a los millones de años con que este tipo de células iniciales contaron para adaptarse al ambiente, pudieron aprovechar al máximo las propiedades físicas y químicas de las primeras moléculas para autorreplicarse –formar copias de sí mismas- y para obtener la energía que necesitaban.

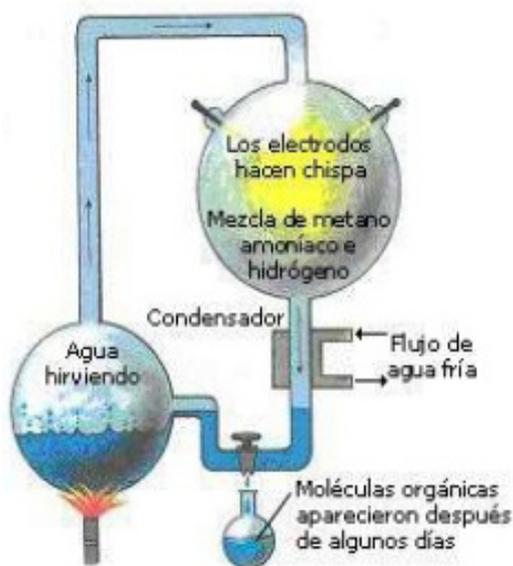
En la década de 1920, el bioquímico ruso Alexander Oparin consideró que la atmósfera de la Tierra debió ser, en sus comienzos, muy diferente a la actual, que contiene un 20 por ciento de oxígeno. Por el contrario, debió ser una atmósfera reductora, es decir, sin presencia de oxígeno (O_2), pero rica en compuestos hidrogenados sencillos como metano (CH_4), amoníaco (NH_3) y agua (H_2O).

Un contenido relativamente alto de oxígeno libre (O_2) en la atmósfera, es un caso único en el Sistema Solar ya que su presencia impide que se realicen las reacciones mediante las cuales las moléculas orgánicas sencillas se transforman en otras más grandes y complejas. La materia orgánica que se debía acumular para actuar como materia prima en la formación de la vida no hubiera sido estable en presencia de oxígeno, lo cual se comprueba con una observación sencilla: cuando un clavo o cualquier otro objeto de hierro se deja a la intemperie, durante unos pocos días, se oxida, como consecuencia de la reacción del hierro del clavo con el oxígeno atmosférico. Sin embargo, al analizar rocas de la era prebiótica (antes de la vida) no se detecta la presencia de óxidos de hierro lo cual indica que, en esa época, no había oxígeno libre.

En la teoría de Oparin, el calor de los volcanes y/o la energía proveniente de la descarga eléctrica de los relámpagos hicieron que el amoníaco, el metano (el gas fétido de las aguas estancadas), el vapor de agua y otros componentes de la atmósfera primitiva reaccionaran para formar compuestos orgánicos simples que se disolvieron en el mar primitivo.

Durante muchos años, la teoría de Oparin se consideró mera especulación hasta cuando un experimento sorprendente, realizado en 1953 por **S. Miller** y **H. Urey** de la Universidad de Chicago demostró que si era posible.

Experimento de Miller y Urey



En 1953, Miller y Urey sometieron una mezcla gaseosa de agua (H_2O), amoníaco (NH_3), metano (CH_4) e hidrógeno (H_2) –gases que se supone se hallaban en la atmósfera primitiva de la Tierra- a la acción de chispas eléctricas producidas mediante un par de electrodos que simulaban las descargas debidas a los relámpagos, que debieron ser frecuentes en la Tierra primitiva. Después de una semana, encontraron disueltos en el agua una gran variedad de compuestos orgánicos; entre ellos, aminoácidos (los integrantes de las proteínas), ácido cianhídrico y formaldehído (precursor de algunos azúcares). Este experimento estableció la posibilidad de producir biomoléculas en períodos relativamente cortos y en condiciones, relativamente suaves, a partir de moléculas muy simples.

En experimentos posteriores, con moléculas iniciales sencillas y con fuentes de energía diversas se obtuvieron una variedad de compuestos orgánicos sencillos. Así, por ejemplo, a partir de un gas muy sencillo, de solo tres átomos, el ácido cianhídrico, HCN (utilizado para la ejecución de reos, en los Estados Unidos) se puede formar adenina, un constituyente del ADN y el ARN. El ácido cianhídrico y el formaldehído, otra molécula sencilla, producidas ambas en el experimento de Miller, se han detectado también en el espacio interestelar. Son compuestos muy reactivos que se combinan fácilmente entre sí, con el agua y con muchas sustancias químicas.

En ausencia de oxígeno, se pueden obtener también los azúcares presentes en el ADN y el ARN.

Varias de las fuentes de energía empleadas en estos experimentos fueron abundantes en los comienzos de la Tierra pero las condiciones han variado notablemente desde esa época hasta ahora, de manera que en la actualidad no se encuentran disponibles. Si lo estuvieran, probablemente la vida que conocemos se acabaría; es lo que ocurre, por ejemplo, con la radiación ultravioleta. Sin embargo, con la aparición de los primeros organismos fotosintéticos apareció también el oxígeno molecular (O_2) en la atmósfera, parte del cual se convirtió en ozono (O_3), en las capas superiores de la atmósfera. Como se sabe, el ozono bloquea la radiación ultravioleta y ayuda, así, a la conservación de la vida.

Años después del experimento de Miller se observó que un meteorito que cayó cerca de Murchison, en Australia, contenía varios de los aminoácidos que Miller había identificado y aproximadamente en las mismas proporciones relativas. También, en el espacio interestelar, mediante el análisis de la luz que llega a través de los telescopios, se descubrieron algunas moléculas que se utilizaron o se produjeron en los experimentos de Miller o en experimentos similares. Primero se descubrió el amoníaco (NH_3), en diciembre de 1968. Poco después, el mismo equipo, descubrió huellas de agua en el espacio y, posteriormente, se reveló la presencia de más de un centenar de moléculas orgánicas diferentes. Tales coincidencias reforzaron la idea de que el experimento de Miller se aproximaba a la química de la Tierra, antes de la vida, y permiten considerar que los aminoácidos para la vida podrían haberlos suministrado los meteoritos o los cometas que debieron llegar en forma abundante a la Tierra, durante los primeros 500 millones de años de su historia. También, en las atmósferas de Júpiter, Saturno y Titán (una luna de Saturno) se han detectado muchos compuestos orgánicos lo cual permite pensar que si la vida se desarrolló en la Tierra por evolución química es posible que lo mismo haya sucedido también en otros planetas adecuados de otros sistemas solares y que los precursores orgánicos para la evolución de la vida sobre la Tierra se pudieron originar también en otros lugares de nuestro sistema solar.

En síntesis, varios compuestos orgánicos se pudieron formar en las condiciones primitivas de la Tierra y en las lunas, cometas y meteoritos. Varias combinaciones de carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno y azufre, bajo la influencia de las descargas eléctricas, la radiación ultravioleta y otras fuentes de energía pudieron haber generado aminoácidos (componentes de las proteínas) y otros componentes orgánicos esenciales. Los productos resultantes fueron depositados en la tierra por la lluvia, los meteoritos y los cometas y, gradualmente, formaron un manto orgánico que cubrió la superficie sin vida, de nuestro recién condensado planeta. Los ríos y riachuelos llevaron estos compuestos a los mares, donde se acumularon hasta que, en palabras de **Haldane**, un brillante científico inglés, “los mares primitivos adquirieron la consistencia de una **sopa diluida y caliente**”. En los lagos interiores, donde la evaporación era rápida, la sopa se espesó hasta alcanzar la consistencia de un puré. En algunos lugares se filtró hasta las entrañas de la Tierra, brotando de nuevo en geiseres y chorros subacuáticos hirvientes y humeantes. Todas estas exposiciones y agitaciones indujeron muchísimas modificaciones e interacciones químicas en los compuestos inicialmente formados y en los que habían llovido de los cielos. Dentro de esta sopa, algunas moléculas orgánicas se asociaron con otras, en grandes complejos que, después de millones de años, se ensamblaron espontáneamente para formar membranas y enzimas que se convirtieron en precursores de las primeras células.

La llegada, en octubre de 2004, del satélite Cassini a Titán, la luna más grande de Saturno, permitió comprobar que su atmósfera está formada por lo menos por una docena de compuestos orgánicos diferentes y que su superficie es un mar de hidrocarburos líquidos, principalmente metano (CH_4), el cual se ha detectado también en Marte. Lo anterior indicaría que, en condiciones apropiadas, la formación de compuestos orgánicos, como los presentes en los seres vivos, no es un proceso complicado.

Genoma artificial

El primer microbio vivo, formado por completo a partir de instrucciones genéticas artificiales, comenzó a proliferar en un tubo de ensayo, en marzo de 2010, en el Craig Venter Institute. Venter y sus colegas construyeron un genoma sintético a partir de una cepa de la bacteria *Mycoplasma mycoides*. Esta hazaña es un gran paso en la creación de vida en el laboratorio. Y es también un refinamiento en las herramientas de la ingeniería genética.

Para fabricar el genoma, Venter y su equipo unieron varios fragmentos cortos de bases nitrogenadas (adenina, citosina, guanina y timina) que insertaron al final de un genoma sintético con más de un millón de pares de bases nitrogenadas -pero todavía más corto que el genoma de *M. mycoides* natural- a una célula de *M. capricolum*. La maquinaria celular natural comenzó a fabricar proteínas, a dividirse y a crecer. Después de tres días, los investigadores encontraron una colonia azul de *M. capricolum* viviendo como *M. mycoides*. Según Venter, esta es la primera célula autorreplicante cuyo padre es un computador.

¿Somos únicos?

Algunas de las inquietudes que atormentan al hombre son ¿por qué hay vida en la Tierra y no en los demás planetas? ¿se encuentra vida en algún otro lugar del Universo?

Vista desde el espacio, la Tierra es un planeta como cualquier otro. Puede haber muchos planetas similares, en un sistema planetario diferente al nuestro; si es así, es probable que la vida tampoco sea un fenómeno único. En la historia de la ciencia, continuamente se comprueba que no ocupamos un lugar privilegiado en el Universo por lo cual sería sorprendente que no hubiera otro lugar en el Universo con las condiciones adecuadas para soportar la vida. El número de estrellas es tan inmenso que aunque la vida fuese algo muy improbable seguiría siendo probable que se hubiera desarrollado en algún otro sitio.

Aunque parece que las condiciones del resto del sistema solar son incompatibles con la vida, tal y como la conocemos en la Tierra, es posible suponer que alrededor de todas las estrellas solitarias giren sistemas planetarios; hasta el momento se han descubierto más de un millar de exoplanetas y constantemente se descubren más. Si consideramos que solo nuestra galaxia cuenta con cien mil millones de estrellas y que además de la Vía Láctea existen millones de galaxias más, las posibilidades de vida aumentan considerablemente.

Las estrellas más adecuadas para el desarrollo de la vida son las que mantienen un equilibrio entre una emisión de energía suficiente para alimentar la vida y una duración larga para permitir que ésta evolucione.

Probablemente, hace más de dos mil millones de años la temperatura superficial de la Tierra fue unos 30 °C más alta que en la actualidad. Si durante este período la Tierra hubiera estado un cinco por ciento más cerca del Sol, la temperatura superficial hubiera estado por encima del límite en que la vida es posible. Por el contrario, si en esa época, la Tierra hubiera estado sólo un uno por ciento más lejos del Sol de lo que se encuentra ahora, toda su agua se encontraría atrapada en los glaciares, desapareciendo toda posibilidad de existencia de vida en la forma en que la conocemos. En otras palabras, un planeta debe estar situado en una determinada zona de temperaturas durante un período suficiente para que exista vida en él.

En el caso de las estrellas binarias en las que dos estrellas giran una alrededor de la otra, es muy poco probable que puedan formarse planetas de tipo terrestre ya que la gravedad de cada estrella provoca perturbaciones muy grandes en las partículas que giran a su alrededor.

Vida en otros planetas

Si llegara a descubrirse otro planeta con características similares a la Tierra sería posible que albergara alguna forma de vida. Probablemente la vida allí, estaría también basada en el carbono. Este elemento tiene una capacidad, que no posee ningún otro elemento químico, de unirse consigo mismo en cadenas largas y de formar una gran variedad de moléculas complejas.

Probablemente la disponibilidad de agua líquida sea otro requisito para la existencia de vida. El agua es el solvente más adecuado para que se realicen las reacciones bioquímicas que posibilitan la aparición y el mantenimiento de la vida y sirve, también de fuente de hidrógeno para la formación de muchos compuestos. Ese planeta, además, debe tener una fuerza de gravedad similar a la de la Tierra, que consiga retener a los océanos y la atmósfera.

La fuerza de gravedad depende del tamaño y la densidad del cuerpo; si el cuerpo es como la Luna, bastante menor y menos densa que la Tierra, su fuerza de gravedad es también mucho menor de tal manera que si se forman capas atmosféricas o agua, pronto se perderán en el espacio. Si, por el contrario, el planeta es de gran tamaño, como Júpiter, con una gran fuerza de gravedad, atraerá, en gran cantidad, gases del espacio como hidrógeno y helio que también impedirán el desarrollo de la vida.

En algunos de los exoplanetas descubiertos se intenta descifrar si podrían tener una forma de vida como la nuestra; si es así, en su atmósfera debe haber oxígeno y dióxido de carbono. Estos gases, como los demás elementos y compuestos químicos, emiten radiación a una determinada longitud de onda que puede ser detectada por alguno de los satélites que se encuentran en el espacio exterior. El oxígeno puro es muy reactivo por lo cual casi de inmediato se combina con elementos metálicos y no metálicos; de esta manera desaparecería rápidamente de la posible atmósfera a no ser que hubiera una fuente orgánica como las plantas, por ejemplo, que mediante un proceso vivo, como la fotosíntesis, lo repusiera continuamente. Si hay organismos vivos que también utilicen el oxígeno para producir energía, como hacen los animales en la Tierra, en ese proceso se produciría gas carbónico (CO_2).

Los seres vivos son un conjunto de células que vienen de otras células
RUDOLF VIRCHOW

No hay nada vivo más sencillo que una célula y nada puede llegar a ser más complejo sin comenzar por ser una célula.

M. HOAGLAND

8. Las células primitivas

A mediados del siglo XVII, un holandés **Leeuwenhock**, vendedor de telas y pulidor de lentes de vidrio, inventó el primer microscopio y se convirtió en el primer cazador de microbios; él observó unas estructuras muy pequeñas, desconocidas hasta ese momento, a las que denominó “animálculos”. Posteriormente, a esas estructuras se las denominó bacterias. Este descubrimiento amplió notablemente el mundo de los seres vivos conformado hasta entonces sólo por animales y vegetales.

Unos años más tarde, **Hooke** observó las unidades microscópicas que componen el corcho (un tejido muerto) y denominó célula (del latín *cella*, hueco) a cada una de esas unidades. Debieron pasar dos siglos más para que se reconociera a la célula como la unidad básica de la vida y un poco más para que se aceptara que la célula, por si sola, ya posee vida.

Los restos más antiguos de la existencia de vida en el planeta son montículos formados por láminas de roca que contienen grandes cantidades de fósiles primitivos con signos de actividad bacteriana; contienen sedimentos y sustancias que debieron ser utilizadas y transformadas por numerosos microbios.

Los fósiles estromatolitos son la única prueba de una actividad biológica prehistórica. Se considera que la antigüedad de los fósiles es de unos 3.500 millones de años, lo que indica que, para esa fecha ya existía la vida en la Tierra.

La primera célula

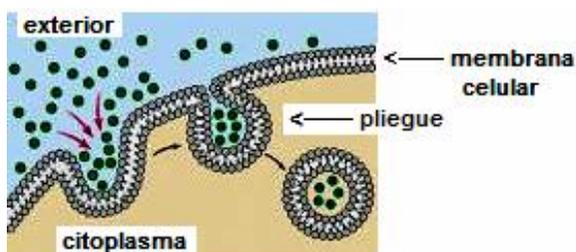
¿Qué aspecto tenía el progenitor de las primeras células y dónde vivía? La respuesta es que, probablemente, tenía el aspecto de una bacteria y vivía en un estanque cálido, quizás cerca de una fuente termal o en una laguna marina. Durante los últimos años se hizo patente que las



Estromatolitos

rocas bajo la Tierra y el mar están impregnadas de miles de millones de bacterias cuya fuente de energía son sustancias químicas.

Para crecer, las primeras células debían aumentar la superficie de contacto con el medio externo para así captar mejor el alimento y excretar los materiales de desecho. La superficie de contacto con el medio externo se debió ampliar mediante la formación de pliegues profundos que permitieron al organismo expandirse hasta alcanzar tamaños mucho mayores que los de las procariotas habituales.



Formación de pliegues de células y bolsas alimenticias internas

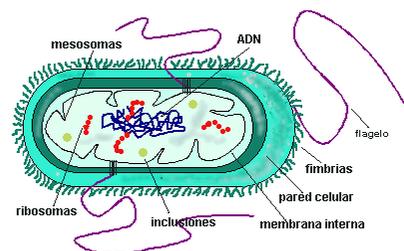
Los pliegues profundos incrementaron la posibilidad de la célula de obtener alimento; probablemente se formaron una especie de islotes, en cuyo interior había elevadas concentraciones de enzimas digestivas que degradaban el alimento de una manera más eficiente. De pronto, los pliegues se desprendieron y formaron bolsas que en vez de dispersarse fueron al interior de la célula.

Los islotes debieron quedar así convertidos en lagunas interiores dentro de las cuales el alimento estaba atrapado junto con las enzimas que lo digerían. Así, la digestión pasó de extracelular a intracelular.

Estos primeros seres vivos que aparecieron sobre la Tierra, hace unos 3.800 millones de años, debieron ser los precursores de las bacterias; éstas se adaptaron e invadieron todos los espacios del planeta. Durante un tiempo prolongado –más de 2.000 millones de años- fueron los únicos organismos vivos sobre la Tierra. A pesar de su tamaño tan pequeño, las bacterias, en conjunto, constituyen la mayor parte de la masa del mundo vivo actual (en relación de 10:1, con respecto a los demás seres vivos juntos) y su diversidad es asombrosa. La razón es que las bacterias están hechas para crecer y reproducirse tan pronto como les sea posible.

Las bacterias

Solo, cuando se inventó el microscopio electrónico, cuatrocientos años después del inventado por Leewenhock, se pudo constatar que **todas** las bacterias están constituidas por una sola célula, muy pequeña, que carece de núcleo. A este tipo de células se las denomina **procariotes** (del latín *pro* que significa “en vez de” y del griego *karyon* que significa núcleo). Es decir, todas las bacterias son procariotes.



Las bacterias, a pesar de estar constituidas por una sola célula, desempeñan todas las funciones de un organismo vivo: metabolismo, reproducción, movimiento, etcétera.

Bacterias anaerobias y aerobias

Cuando las primeras bacterias hicieron su aparición sobre la Tierra, no había oxígeno en la atmósfera. Es decir eran anaeróbicas; todavía, en la actualidad, hay bacterias que no pueden crecer ni reproducirse en presencia de oxígeno.

El gas que respiramos y que actualmente constituye el veinte por ciento del aire, es un producto de la vida. Se originó hace unos 2.300 millones de años, cuando aparecieron unas bacterias fotosintéticas -denominadas **cianobacterias**- que eran capaces de utilizar la luz, como fuente de energía, para producir oxígeno (O₂). La presencia de este gas produjo un cambio sustancial en la atmósfera terrestre y en el proceso de desarrollo de los procesos vitales: sin el oxígeno, la vida que hoy conocemos no se hubiera desarrollado. Sin embargo, el incremento en la concentración del oxígeno atmosférico también debió causar la muerte de muchos organismos primitivos. Solo sobrevivieron los que desarrollaron mecanismos para protegerse de este gas o los que encontraron refugio en las lagunas que se formaron en los cráteres de volcanes apagados o en otros sitios donde no podía llegar el oxígeno atmosférico.

Las membranas

En cualquier célula lo primero que se observa es una envoltura muy delgada, la membrana. Las burbujas de jabón son membranas muy delgadas, similares a las que se encuentran en las células. De niños jugábamos con el jabón y producíamos burbujas constituidas por una membrana muy delgada, similar a la que se encuentra en las células..

Las membranas celulares están constituidas por una doble capa de lípidos (la cera, las grasas, los aceites, el colesterol, son ejemplos de lípidos). Como los lípidos son insolubles en agua, ésta no puede atravesar la membrana en ningún sentido; por lo tanto, la membrana impide que el agua del interior de la célula se salga o, por el contrario, que la célula se hinche con el agua circundante y explote.

Es probable que desde las primeras membranas celulares, los componentes fueran unas moléculas denominadas fosfolípidos. Estas moléculas tienen unas características especiales

porque, dentro de la misma estructura, se encuentra una parte (el fosfato) que es soluble en agua y otra parte (el lípido) que no lo es. Estas propiedades duales y antagónicas le confieren a la membrana fluidez y flexibilidad.

Por otro lado, fabricar membranas artificiales es fácil: basta tener una mezcla de fosfolípidos y agitarla fuertemente o utilizar ultrasonido. Y tanto la agitación y el sonido intenso, por medio de los volcanes u otros medios, se debieron producir con frecuencia en la Tierra primitiva.

Se podría pensar que las membranas fueron las primeras estructuras de la célula a partir de las cuales se construyó todo lo demás. Pero cuando todavía no había células y no había tampoco organismos que fabricaran alimento, las membranas no podían desempeñar ninguna función. Es probable que, por el contrario, en un comienzo, en lagunas y charcos y en zonas costeras, se formaran diversas sustancias orgánicas, por mera interacción química y por la intervención de diversas fuentes de energía como la radiación ultravioleta, el calor de los volcanes o la energía eléctrica proveniente de los rayos. La concentración de las sustancias orgánicas pudo ir aumentando hasta constituir una “sopa espesa”; en ese caso, los fosfolípidos pudieron formar una especie de membrana que impidió la dispersión de los nutrientes.

En el mundo viviente actual, una membrana siempre se moldea a partir de otra ya preexistente. Por lo tanto, es posible que, en la historia de la vida, solo haya habido una membrana inicial que se formó como una “nata” aceitosa; las membranas subsiguientes se configuraron a partir de la membrana primitiva.

Para sobrevivir, las células deben tomar alimento del exterior y deshacerse de los materiales de desecho. La manera más simple de hacerlo es mediante poros o sea agujeros simples y abiertos. Con el tiempo aparecieron canales más sofisticados y selectivos.

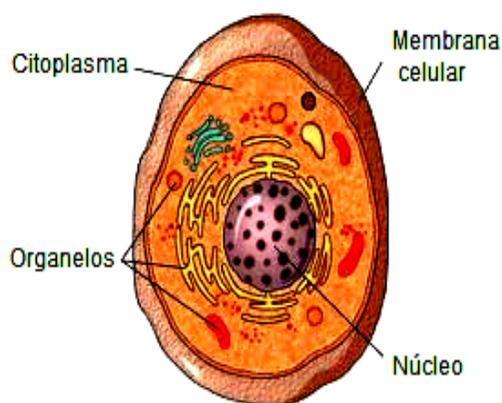
Fox y Oparin (y luego otros) demostraron, experimentalmente, que era posible producir unas gotitas rudimentarias, con diversos compuestos, que se generaban de manera espontánea, se rodeaban de una membrana y tenían la capacidad de catalizar algunas reacciones similares a las que ocurren en las células vivas.

Células eucarióticas

Los hongos, las plantas y los animales (y, entre ellos los humanos) están constituidos por millones y millones de células con núcleo por lo cual se les denomina, en conjunto, como

organismos **eucariotes**. (del griego *eu*, verdadero y *karyon*, núcleo). Una célula eucariótica proveniente de un hongo o de una planta o de la piel o de la sangre o de cualquier otro órgano, es de mil a diez mil veces más grande que una célula procariótica.

En los eucariotes, el material genético que le permite a la célula reproducirse, se encuentra dentro de un núcleo. Alrededor del núcleo se sitúa el citoplasma que contiene diversos organelos (mitocondrias, cloroplastos, etc.), cada uno con una función específica.



Células Eucarióticas
(Animales, plantas)

¿Cómo aparecieron las células eucarióticas? Mientras no hubo oxígeno, las bacterias fueron la única forma de vida; pero cuando las bacterias cianofíceas comenzaron a producir oxígeno, otras bacterias estaban en la obligación de adaptarse a esa situación o perecer; debieron evolucionar durante el período en el cual la concentración de oxígeno en el ambiente era todavía baja. Hace mil millones de años, cuando la concentración de oxígeno en el ambiente era ya elevada y estable y después de un proceso de transformación bastante largo, algunas procariotas se convirtieron en eucariotas.

Si se compara una bacteria, con la más primitiva de las células eucarióticas, las diferencias son tan abismales que la conversión de una bacteria en un eucariote parece inimaginable. Por un lado, como ya lo mencionamos, las células eucarióticas son de mil a diez mil veces más grandes que las bacterias; por otro, las células eucarióticas tienen un conjunto de organelos -mitocondrias, protoplastos, peroxisomas, entre otros varios- que no se encuentran en las bacterias.

Los organelos presentes en las células eucarióticas son, más o menos, del tamaño de una bacteria lo que llevó a algunos científicos a pensar que cada organelo podía ser descendiente de una determinada clase de bacteria diferente.

Es posible que una bacteria haya crecido bastante más que las otras, tanto que haya sido capaz de engullir bacterias más pequeñas. Muchas células eucarióticas actuales, tales como los leucocitos (o glóbulos blancos de la sangre), por ejemplo, engullen bacterias. Por lo general, los microorganismos atrapados mueren y se degradan aunque, a veces sucede lo contrario: las bacterias sobreviven y, en algunos casos, dañan a sus captosres, incluso hasta causarles la muerte; es el caso de las infecciones. Hay una tercera posibilidad, la menos frecuente: es que el captor y la víctima sobrevivan en un estado de mutua tolerancia que después se convierte en

asistencia recíproca y, por último, incluso en dependencia. Se llega a un estado que se denomina **simbiosis** en el cual ambos resultan favorecidos. Mitocondrias y cloroplastos pudieron así haber sido huéspedes permanentes de una célula más grande que los albergó.

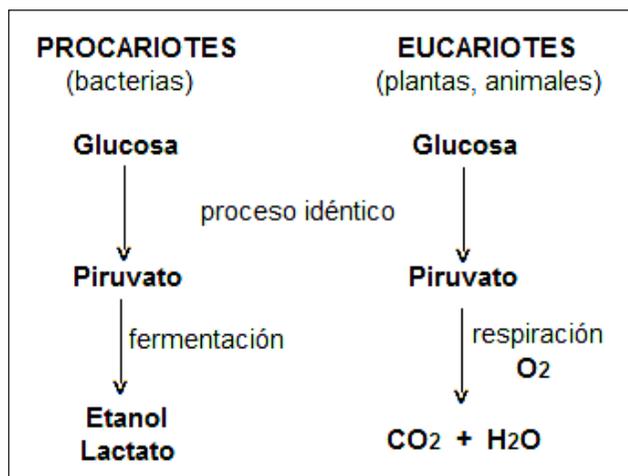
¿Qué características debía tener la célula engullidora? Naturalmente debía tener un tamaño superior al de su presa, estar rodeada por una membrana flexible, contar con una red interna de compartimentos conectados con la membrana externa y disponer de la maquinaria para degradar los materiales ingeridos.

Es posible que la célula engullidora se alimentara de los desechos excretados por otras células. Vivía, pues, en un medio donde encontraba el alimento. Para digerirlo utilizaba enzimas (proteínas que aceleran las reacciones) que segregaba al exterior; estas enzimas descomponían el alimento antes de ser ingerido.

De manera similar se puede explicar la formación del núcleo, la estructura más característica de las células eucarióticas: pudo ser el resultado del desplazamiento al interior, de una zona de la membrana externa de la célula a la cual estaba adherido un cromosoma (en las células procarióticas actuales, el cromosoma se encuentra internamente adherido a la membrana de la célula). De esta forma, un pequeño procariote se pudo transformar en una célula gigante que ya disponía de un núcleo. Esta célula dotada ya de una organización eficiente para alimentarse de bacterias, sería un poderoso cazador que habría dejado de estar condenado a residir entre depósitos de alimento y ahora podía moverse con entera libertad por el mundo persiguiendo activamente su presa.

Otra prueba de que las células eucarióticas descienden de las procarióticas es el hecho de que las reacciones iniciales en el desdoblamiento de la glucosa son las mismas para ambos tipos de células. Si hay oxígeno, las reacciones continúan en las eucariotas hasta producir dióxido de carbono (CO_2) y agua:

Desdoblamiento de la glucosa en procariotes y eucariotes.



En las células eucarióticas el proceso metabólico central es la respiración que puede describirse como la combustión (requiere oxígeno) de la glucosa (el azúcar más común en los seres vivos) con el oxígeno para producir dióxido de carbono (CO_2), agua y energía. Este hecho ratifica que las eucariotas siempre han sido dependientes del oxígeno por lo cual debieron aparecer después de que este gas entró a formar parte de la atmósfera de la Tierra.

Probablemente, esta célula gigante primitiva todavía carecía de **mitocondrias** y otras estructuras características de las actuales células eucarióticas, como los **cloroplastos**, en las células vegetales.

Algunas procariotas también son capaces de respirar pero son la excepción. La inmensa mayoría obtienen su energía únicamente del proceso más simple de la fermentación. En la fermentación bacteriana, la glucosa no se combina con el oxígeno, ni con ninguna otra sustancia extraña a la célula: se desdobra sencillamente en moléculas más pequeñas como el etanol o el ácido láctico.

Adicionalmente, a pesar de sus diferencias en tamaño y complejidad, todas las células, procarióticas y eucarióticas, utilizan los mismos materiales de construcción -los mismos aminoácidos (componentes de las proteínas)-, las mismas moléculas para transmitir la información genética (ADN y ARN) y, en general, los mismos tipos de moléculas y la misma maquinaria general para fabricar sus moléculas, realizar su metabolismo y gobernar las mismas actividades celulares. Todas estas características comunes conducen a pensar que, sin excepción, las formas de vida actuales proceden de un progenitor único o de la misma célula primaria. Si, de pronto, aparecieron otras células estas se debieron quedar tan rezagadas en su desarrollo que, con el tiempo, se desintegraron y desaparecieron. Y si la vida se hubiera generado, más de una vez, en cada inicio se deberían haber utilizado distintos materiales de construcción y maquinarias diferentes.

Hace mil millones de años los continentes eran grandes extensiones estériles sembradas de rocas y de lava, desiertos que se cocían al sol durante el día y se congelaban durante la noche. En esos desiertos rara vez caía la lluvia y la poca que caía no era posible conservarla por falta de una capa vegetal. En contraste, los océanos se encontraban llenos de toda clase de formas de vida primitiva, constituida por individuos con una sola célula. Abundaban las bacterias lo mismo que los eucariotes unicelulares (constituidos por una sola célula). Estos formaron toda clase de asociaciones, la mayoría de las cuales no lograron sobrevivir; tan solo unas pocas resultaron ventajosas y se desarrollaron.

El paso de un organismo constituido por una sola célula a un organismo constituido por muchas

células representó varias ventajas: (1) los organismos pluricelulares viven más tiempo al poder reemplazar las células individuales que mueren; (2) producen una mayor descendencia ya que muchas células se pueden dedicar a la reproducción; (3) alcanzan un tamaño mucho mayor; (4) disponen de una estabilidad fisiológica interna; (5) construyen cuerpos muy diversos y (6) las células constituyentes son más eficientes porque se pueden especializar (neuronas, células sanguíneas, musculares, reproductoras, etcétera).

Las células permanecieron juntas mediante (a) conexiones intercelulares y dieron origen a los animales o (b) por medio de una pared o cápsula externa compartida y dieron origen a las plantas.

9. Las plantas

Los cloroplastos se encargan de realizar la fotosíntesis en las plantas verdes: esto quiere decir que captan la energía lumínica proveniente del Sol y la utilizan para fabricar el alimento que la planta necesita. Los cloroplastos se pudieron formar de la misma manera que las mitocondrias pero, en este caso, la bacteria engullida y no consumida fue una bacteria cianofícea. La incorporación de los cloroplastos dentro de unas células más grandes probablemente ocurrió con posterioridad a la adopción de las mitocondrias. Las ventajas de la unión de los cloroplastos son obvias: las células que antes necesitaban contar con un suministro constante de alimentos, ahora podían fabricarlos a partir de luz, agua, aire y unos pocos minerales en disolución.

La prueba más aplastante del origen bacteriano de mitocondrias y cloroplastos es que en ellos se encuentran los vestigios de un sistema genético propio que todavía es funcional. Es decir, se ratifica que mitocondrias y cloroplastos son una especie de células pequeñas encerradas en una más grande.

Las plantas son fotótrofas; esto significa que utilizan la luz del Sol como fuente de energía para fabricar su propio alimento, a partir del gas carbónico disuelto en el aire y los nutrientes minerales del suelo. Estos nutrientes y la luz del Sol están disponibles en cualquier lugar por lo cual las plantas no necesitan desplazarse para conseguirlos. Los animales, por el contrario, deben buscar su alimento; alguno lo encuentran en las plantas. En otros casos deben atrapar la presa por lo cual deben conservar la libertad de movimiento aunque eso, en algunos casos, signifique una mayor fragilidad.

Las algas

Las primeras plantas debieron ser acuáticas, probablemente algas. Las algas aparecieron en el medio acuoso y siguen adaptadas a él. Tienen, además, la capacidad de captar la energía luminosa proveniente del Sol y sintetizar sus propias moléculas.

Las algas debieron vivir en los fondos marinos a una profundidad tal que alcanzaran a captar

los rayos solares pero sin permanecer al descubierto en las mareas bajas. Esta situación, intermedia entre dos ambientes, les permitía disponer de energía solar y del gas carbónico de la atmósfera, para realizar la fotosíntesis y, al mismo tiempo, utilizar el agua proporcionada directamente por el mar, para evitar el peligro de la deshidratación. En algún momento se debieron desarrollar algas anfibias que disponían de una cutícula capaz de mantener la humedad en el interior.

Mientras las algas permanecieron en el mar, tuvieron un suministro permanente de agua y de minerales esenciales, suministro que en tierra era bastante esporádico. Por lo tanto, el primer problema de las algas, tan pronto se establecieron en tierra firme, fue evitar la desecación. Las plantas que adquirieron una cubierta impermeable que impidió que el agua interna se evaporara, resolvieron este problema y pudieron sobrevivir

En algunos casos, los charcos y lagunas que contenían algas debieron quedar incomunicados de los océanos y se secaron lentamente, dejando con vida solo aquellas plantas que lograron adaptarse a la creciente sequía. El proceso debió ser progresivo a medida que las plantas se alejaban de la costa hacia zonas más altas y secas y disminuía la humedad. Las plantas menos adaptadas permanecieron más cerca del agua mientras que las más adaptadas se adentraron más en tierra firme. Ya, en este nuevo ambiente, el primer paso, a medida que se fueron alejando del agua, fue evitar la desecación. Las plantas que adquirieron una cubierta impermeable solucionaron este problema. Pero, entonces, surgió un nuevo problema: con la cubierta se hizo muy difícil tomar los nutrientes del suelo. Para solucionar esta situación, muchas plantas desarrollaron proyecciones superficiales que sirvieron para fijar la planta al suelo e impedir que el viento se las llevara lejos de la vital humedad. Estas proyecciones fueron las precursoras de las raíces. Por otra lado, en la parte aérea de la planta, las hojas desarrollaron unas pequeñas aberturas para captar la energía luminosa, absorber el dióxido de carbono de la atmósfera y eliminar el oxígeno (al contrario de lo que sucede en nuestros pulmones).

Las semillas

Para que las plantas se establecieran por completo sobre la tierra se necesitaba una última adaptación: asegurar su reproducción sin la participación de células progenitoras acuáticas. Las esporas (células reproductoras) desarrollaron cubiertas protectoras y sirvieron de vehículo de diseminación aérea. En el suelo permanecían latentes hasta que se presentaba la suficiente humedad para dar inicio a la germinación. Las plantas que surgieron de la germinación de estas esporas produjeron células reproductoras masculinas móviles y huevos femeninos inmó-

viles, en estructuras vecinas que conservaban suficiente humedad para permitir que las células reproductoras masculinas nadaran hacia las femeninas para fertilizarlas.

Plantas primitivas



Musgo



Helecho

Hace unos 440 millones de años, a partir de las algas se desarrollaron los musgos, los helechos y otras plantas primitivas. Esas primeras plantas no poseían hojas ni flores; eran simples tallos desnudos, de escasa altura (unos 30 centímetros). Los musgos iniciales comenzaron a cubrir las costas con alfombras verdes que se extendieron cada vez más hacia adentro a medida que los precursores de las raíces penetraban cada vez más hondo en la tierra para obtener agua y minerales.

Las plantas iniciales se encontraban, en su mayor parte, ubicadas en los bordes costeros húmedos, dejando grandes extensiones de tierra seca desolada. La conquista de los desiertos antiguos se llevó a cabo centímetro a centímetro y estuvo a cargo de plantas mutantes que, al igual que los musgos, poco a poco adquirieron unas raíces capaces de penetrar más profundamente dentro del suelo para absorber agua y nutrientes de manera más eficaz. Luego, desarrollaron canales de conducción que permitieron que, por un lado, el agua y los minerales absorbidos fluyeran desde las raíces hacia arriba, a otras partes de la planta, y, por otro, que los productos fotosintéticos orgánicos, fabricados en las partes verdes, fluyeran en sentido contrario, hacia las raíces. Gracias a la formación de esos conductos, las plantas pudieron crecer en tamaño y expandir sus partes fotosintéticas, captadoras de la luz.

Hace unos 400 millones de años, los ejércitos verdes, reclutados desde los océanos, comenzaron a invadir la tierra, en forma masiva, ayudados por cambios geográficos y climáticos que ocurrieron en ese momento y a los que ellos mismos contribuyeron con el agua que extrajeron del suelo. La atmósfera se tornó más húmeda, las lluvias más abundantes y el suelo fue más capaz de contener la humedad. A estos invasores los acompañaron bacterias de todos los tipos; pronto surgieron los primeros hongos y los animales terrestres.

Las plantas crecieron en tamaño y desarrollaron una sustancia bastante fuerte denominada lignina que hizo posible la formación de troncos macizos. Aparecieron árboles de hasta doce metros de altura y un metro de diámetro. Grandes extensiones de tierra se convirtieron en enormes pantanos tropicales que albergaban una rica vegetación que crecía más rápidamente que los organismos que se alimentaban de ella. Los residuos muertos de estas plantas se fueron acumulando y fosilizando, creando los enormes depósitos de material rico en carbono que hoy día aprovechamos en forma de carbón. De ahí que a la era geológica comprendida entre hace 280 y 360 millones de años, cuando aparecieron dichos pantanos, se le haya dado el nombre de carbonífera. En todo caso, gracias a estos pantanos, en solo 100 millones de años, se pasó de los primeros musgos a los bosques tupidos.

La mayoría de los pioneros en la conquista del ambiente terrestre se extinguieron hace ya muchos años. Sus parientes vivos más cercanos, conforme al registro fósil, son los helechos de los cuales se conocen unas nueve mil especies. ¿Qué causó la extinción de tantas plantas? Como en muchos otros casos, los responsables fueron los cambios en las condiciones geográficas y climáticas.

Luego de 50 millones de años de desarrollo exitoso, los grandes pantanos carboníferos comenzaron a secarse y sus bosques a desaparecer lentamente. No solo se arrasaron las plantas terrestres sino también gran parte de la vida marina. Este período geológico que tuvo lugar hace entre 280 a 250 millones de años se conoce como la gran crisis pérmica. La dramática extinción en masa se debió probablemente al acercamiento y fusión de todas las zonas terrestres para formar un solo megacontinente, Pangea. Mucha de la superficie interna de este continente se convirtió en un inmenso desierto. Simultáneamente, el clima se tornó mucho más frío como consecuencia, tal vez, de erupciones volcánicas catastróficas, en lo que hoy es Siberia, que oscurecieron el cielo y taparon el Sol. Una buena parte de Pangea se encontraba situada sobre el Polo Sur, cubierta por una gruesa capa de hielo. Los glaciares bordeaban sus costas con picos macizos congelados que, poco a poco, se desmoronaron formando enormes bloques de hielo; estos bloques fueron arrastrados por las corrientes y enfriaron los mares aún hasta los trópicos. La Tierra había entrado en la edad de hielo más dura de su historia.

Las plantas reaccionaron contra esta situación crítica reemplazando las esporas por semillas, como medio de diseminación. Esta transformación marcó la emancipación femenina vegetal. En vez de que un solo tipo de espora diera lugar a un organismo, comenzaron a aparecer dos tipos de esporas: unas grandes –las macroesporas- dieron lugar a organismos femeninos y otras pequeñas –las microesporas- originaron los organismos masculinos. Entonces se hizo necesario que las células espermáticas masculinas buscaran un organismo femenino donde hubiera huevos para fertilizar.

El siguiente paso en la evolución fue la transferencia del lugar de la fertilización del suelo a la planta misma. Las macroesporas ya no se liberaban para germinar en el suelo sino que completaban su maduración dentro de la planta, en órganos especiales llamados óvulos, de los cuales surgían los huevos dentro de un capullo de estructuras protectoras y nutritivas.

Las esporas masculinas continuaron dispersándose en forma de granos de polen llevados por el aire que, sin embargo, ahora se encontraban programadas para continuar su maduración solo dentro de un óvulo compatible. Se producía, así, una cantidad inmensa de granos de polen de tal manera que, aunque muchos se perdían, algunos caían en un óvulo. El producto final era un embrión que, finalmente, se convertía en una semilla que se liberaba al exterior.

Una vez dispersas las semillas, su cubierta servía de protección al embrión contra el frío y la sequedad, en espera de que las circunstancias favorables indujeran a los embriones a reanudar el desarrollo y salir de su concha protectora. Dentro de las semillas se encontraban algunas sustancias de reserva que suministraban los nutrientes indispensables para que los embriones sobrevivieran el tiempo necesario mientras aparecían las primeras raicillas y las primeras hojitas que indicaban el surgimiento de una nueva planta autónoma. Tal adaptación no hubiera tenido ninguna importancia para una planta habitante de los pantanos pero sería muy útil en caso de que las condiciones geográficas y climáticas se tornaran más agrestes; las semillas son capaces de resistir condiciones físicas extremas durante meses y aún durante años y siglos, hasta que llegue un momento favorable que permita la germinación y la implantación.

Las plantas como los helechos de semilla, algunas palmas y las coníferas (pinos, cipreses y abedules) forman la superfamilia de las **gimnospermas** (del griego *gymnos*, desnudo y *sperma*, semilla) que invadieron las inhóspitas tierras de Pangea. La otra superfamilia, las **angiospermas** (del griego *aggeion*, envoltura) la forman las plantas con flores, cuyas semillas se encuentran dentro de los frutos.

Las angiospermas, con 275.000 especies diferentes de plantas con flores, constituyen la forma de vida vegetal más abundante (cinco veces el total de las especies restantes del reino vegetal)

y avanzada de la Tierra. Hace unos cien millones de años, cuando Pangea se fragmentó y se trasladó hacia el norte, estas clase de plantas comenzaron a extenderse sobre los continentes.

No se sabe cómo se formaron las angiospermas. Se supone que alguna planta de semilla sufrió alguna mutación que hizo que las hojas que rodeaban los órganos sexuales carecieran de clorofila –el pigmento verde responsable de captar la luz solar- y se tornarían blancas o amarillas o rosadas, en caso de que hubieran conservado algunos pigmentos diferentes a la clorofila. De pronto, el paisaje verde y uniforme de los campos y bosques primitivos se vio salpicado de parches brillantes que sirvieron de guía a los insectos para moverse hacia la luz. ¡Habían nacido las flores! Así, el accidente genético sufrido por la planta, se convirtió en beneficio: los insectos así atraídos por las plantas, recogían, al azar, granos de polen de los órganos masculinos de la planta, los llevaban sobre sus cuerpos y depositaban algunos de ellos sobre los órganos femeninos. Mutaciones subsiguientes de las plantas llevaron a nuevas formas y colores y a una variedad de aromas que atrajeron a toda clase de insectos polinizadores y también a otros animales como pájaros y murciélagos.

La propiedad clave de las flores es que se convierten en frutos. Un fruto es la colección de una o más semillas, dentro de una cáscara. Esta se deriva de la parte femenina de la flor y consta de una cubierta protectora y de tejidos nutritivos.

Micetos

A las plantas que comenzaron a invadir la Tierra les siguió una horda de organismos incoloros (carentes de clorofila), inmóviles e incapaces de atrapar ninguna presa, por lo cual, para subsistir, dependían por completo de las plantas. Es decir, eran parásitos que se aferraban estrechamente a sus plantas compañeras o a residuos de plantas muertas a las que atacaban con poderosas enzimas digestivas. Los productos solubles de la digestión los absorbían por infiltración a través de su superficie.

Esta forma de vida primitiva e incierta se convirtió en una fórmula tremendamente exitosa que formó el amplio grupo de los micetos (del griego *mykaces*, mohos) que incluye a hongos, levaduras y mohos.

Aunque durante mucho tiempo los micetos se clasificaron dentro del reino vegetal –se consideraban derivados de algunas plantas que habían perdido sus cloroplastos- en la actualidad se los ubica dentro de un reino separado, diferente a los reinos animal y vegetal. Contrario a su apariencia, los resultados de la secuenciación molecular indican que los micetos tienen más relación con los animales que con las plantas.

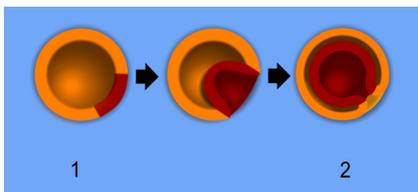
10. Aparecen los animales

Los primeros organismos multicelulares

Los primeros restos fósiles conocidos de organismos multicelulares se encontraron en Ediacara, al sur de Australia, por lo cual se los conoce como fauna ediacareense y corresponden a un período de entre hace 635 y 540 millones de años, cuando después de una profunda glaciación, las células se asociaron para producir seres pluricelulares simples, sin boca y sin ningún órgano especial. Después llegó la especialización: cada célula de ese organismo pluricelular, comenzó a desarrollar un trabajo. De allí surgieron casi todos los grupos de invertebrados.

Se pasó, así, de organismos unicelulares a individuos que son, en la práctica, colonias super organizadas de células, encerradas en un envoltorio y dotadas de una eficaz división de las tareas. Cada célula asume un papel, como un individuo en una sociedad. Por ejemplo, no debe ya procurarse alimento por sí sola porque hay alguna otra que se lo procura (lo recoge, lo digiere, lo lleva a domicilio a través del sistema circulatorio y, por último, elimina también los desechos). Es decir la economía de subsistencia, donde cada uno ha de desempeñar todas las tareas, se transformó en una economía de mercado, donde cada célula recibe lo que necesita dando alguna otra cosa a cambio. Nace así la cooperación y la especialización. Cada célula depende de la actividad de las demás y la que no funciona no solo se perjudica a sí misma sino también al conjunto.

Diploblastos



Diploblastos

Probablemente, los animales multicelulares más primitivos fueron los diploblastos, formados por dos capas superpuestas; una de ellas se convirtió en la piel del animal; la otra, se transformó en un recubrimiento mucoso digestivo.

El diploblasto primitivo se dividió en dos ramas: una evolucionó hasta formar una red de canales interconectados. El agua que pasaba por estos canales les proporcionaba bacterias y partículas alimenticias más pequeñas así como también sales minerales y oxígeno y se llevaba los productos de desecho. Esta modificación resultó ventajosa: en vez de depender de un lento arrastre para encontrar alimento, los organismos ahora podían filtrar grandes cantidades de agua a través de sus canales. Al no tener necesidad de moverse se volvieron fijos y crearon un laboratorio de cavidades y canales cada vez más complicado. Sus descendientes actuales son las esponjas.



Esponja marina

A pesar de su apariencia vegetal, las esponjas son animales. Filtran grandes cantidades de líquido y absorben el alimento que se puede encontrar en el agua. Son como una especie de intestino plantado en las profundidades, en espera de que entre un poco de alimento. Con el agua entra también el oxígeno del que tienen necesidad las células para respirar. Y por la salida son expulsados los desechos. No existen, en su interior, zonas sexuales específicas: las células reproductoras pueden desarrollarse por todas partes. Las células sexuales masculinas entran en cámaras donde encuentran a las femeninas (huevos); así se produce la fecundación que da lugar a larvas. Las esponjas no sólo se reproducen sexualmente, sino también por gemación, a través de la división de la célula normal.

Períodos evolutivos de los animales

Era	Período	Millones de años	Características
Paleozoica	Explosión cámbrica	545	Cambios evolutivos y diversificación rápida de las formas de vida. Presencia de procariotes. Florece la vida animal en los mares: aparecen los miembros más primitivos de muchos animales multicelulares. Gusanos; además, hongos y algas
	Ordovícico	490	No había animales en tierra firme por la escasez de oxígeno en la atmósfera. En el mar se encontraban los antecesores de los crustáceos: langostinos, cangrejos, etc., estrellas de mar y moluscos (animales de cuerpo blando): caracoles, pulpos, calamares, además de peces dotados de mandíbula. Al final del período se extinguieron el 60 % de las especies marinas
	Silúrico	445	Nivel del mar muy elevado. Aparecieron los vertebrados acuáticos, los tiburones espinosos y los peces cartilaginosos. Primer animal de respiración aérea.

Era	Período	Millones de años	Características
	Devónico	395	Aparecieron los tiburones primitivos, los primeros peces óseos, los primeros peces con escamas duras, los arrecifes de coral, los anfibios. La tierra fue colonizada por los artrópodos: cangrejos, insectos, arañas, ciempiés, escorpiones, ácaros.
	Carbonífero	360	El nivel de los océanos descendió. Las tierras se reunieron en el supercontinente Pangea. Los peces se diversificaron; pulpos y calamares. Primeros reptiles, insectos voladores y tiburones. Aparecieron los vertebrados que viven permanentemente en tierra: reptiles, aves y mamíferos..
	Pérmico	300	El cambio climático lleva a condiciones más secas y áridas. Se extinguió el 95 % de la vida en la tierra. Los helechos con semilla y los reptiles heredan la tierra.
Mesozoica		250	Era de los reptiles o de los dinosaurios. Aparecieron los mamíferos, las aves y las plantas con flores (angiospermas). Invertebrados: amonites. Clima cálido
Cenozoica		65	Se extinguen los dinosaurios y aparecen los mamíferos, entre ellos, los primates, los homínidos y el homo sapiens. Aparecen las plantas con flores y frutos con semillas. Surgen los árboles actuales.



Medusa

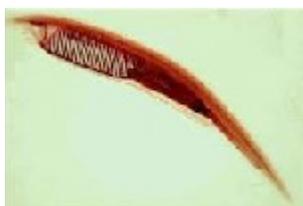
Otra rama de los diploblastos tomó la forma de bolsas miniaturas de doble pared que se abrían al exterior por medio de un estrecho orificio. Gracias a esta transformación, los organismos tuvieron una cavidad digestiva separada que, con el tiempo, adquirió apéndices para atrapar la comida. El resultado fue una pequeña medusa primitiva, ancestro común de las hidras, los pólipos, las anémonas marinas y otros organismos relacionados que, en conjunto, se conocen con el nombre de **celenterados**.

La medusa es un animal sin órganos: no tiene aparato respiratorio o circulatorio o excretor pero posee algunas células nerviosas y músculos. Respira a través de la membrana haciendo entrar oxígeno y expulsando anhídrido carbónico (CO₂).

En la bolsa alimenticia, con una sola abertura, pronto apareció una perforación adicional en el fondo. Con esta modificación, el alimento pudo entrar por un extremo y los desechos salir por el extremo opuesto, sin mezclarse. Esta disposición alargada, con una boca y un ano, la conservan hoy en día, todos los animales. Alrededor de la boca comenzaron a congregarse células nerviosas que, mucho más tarde, darían lugar al cerebro y a órganos excretores y reproductores.

Debido a su cuerpo blando, estos animales no dejaron residuos fósiles. Sin embargo, se han conservado sus huellas y sus madrigueras plasmadas en barro petrificado hace más de 600 millones de años. Sus descendientes actuales más primitivos son los gusanos planos, algunos de los cuales se han adaptado a la vida parasitaria y poseen un sistema alimentario atrofiado. Un ejemplo típico es la tenia que habita en el tracto digestivo de los animales. Otros representantes son los gusanos redondos (nematodos) que se encuentran en todo lado; se considera que este es el tipo de vida animal más abundante en el mundo.

En la actualidad existe un animal pequeño y extraño, el anfioxo, mezcla de pez y gusano semitransparente y de una longitud cercana a los diez centímetros. En lugar de boca cuenta con una abertura frontal a través de la cual toma el agua, con material alimenticio en suspensión, y la elimina a través de un conjunto de hendiduras branquiales dispuestas a lado y lado de su cuerpo; a través de esas hendiduras se lleva a cabo el intercambio respiratorio de gases.



Anfioxo

El anfioxo no posee cabeza propiamente dicha ni oídos, ni corazón, ni vasos sanguíneos, ni órgano del olfato. Tampoco esqueleto pero si está dotado de un cordón fuerte y flexible, el notocordio, elaborado con un material que no es óseo ni cartilaginoso y que recorre el cuerpo del animal longitudinalmente, en la posición en que los animales llevan la columna vertebral. El notocordio le da al animal resistencia mecánica y

flexibilidad y sirve de soporte para el sistema muscular. El pequeño animal es capaz de moverse con relativa facilidad o enterrarse en la arena, sitio donde permanece la mayor parte del tiempo protegido de los depredadores. Solo asoma la abertura frontal cuando toma el alimento.

Se supone que los gusanos y lombrices que forman el grupo de los **anélidos** (del latín *anulus*, anillo) se formaron por la unión de segmentos circulares (anillos). Cada segmento era, de por sí, un organismo de tal manera que el animal completo parecía una cadena de gusanos primitivos unidos por punta y punta mediante conexiones sucesivas. Los segmentos se unían entre sí por la piel, un canal alimentario continuo y un cordón nervioso. La cabeza y la cola se encontraban conformados de la misma manera que los demás segmentos.

Entre los gusanos primitivos se encuentran algunos que vivían enterrados en el espesor del fango. Los actuales son la versión moderna de las lombrices. Escondidos en sus agujeros trataban de aprovechar el alimento de paso, filtrando en la arena en busca de compuestos orgánicos.

En los esquistos de Burgess, localizados en la parte occidental de Canadá y formados a partir de los sedimentos de antiguos pantanos pobres en oxígeno (circunstancia que favoreció la fosilización de organismos de cuerpo blando) se encontró una profusión de restos de criaturas extrañas.

La explosión cámbrica

En el período geológico conocido como Cámbrico, hace entre 600 y 520 millones de años, hubo una súbita aparición de nuevos animales marinos, algunos de los cuales con partes duras, muchos de ellos extinguidos en la actualidad, pero de los cuales se conservan registros fósiles. Los paleontólogos llaman a este inesperado aumento de diversidad de animales marinos, la explosión cámbrica. En quizá tan sólo 10 millones de años, los animales marinos desarrollaron la mayor parte de los planes corporales básicos que observamos en los grupos actuales. Entre los organismos que se conservan en fósiles de esta época hay parientes de los crustáceos y las estrellas de mar, esponjas, moluscos, gusanos, cordados y algas. Probablemente, el aumento en diversidad fue parejo con el incremento en el contenido del oxígeno atmosférico.

Aparición del oxígeno



Colonia de cianobacterias

Cientos de millones de años atrás habían aparecido las cianobacterias, capaces de realizar fotosíntesis y generar oxígeno. Inicialmente este gas reaccionó con los minerales disponibles en el mar y sobre la superficie de la Tierra, de tal manera que su concentración se mantuvo más o menos constante durante bastante tiempo. Pero cuando los depósitos minerales se saturaron con oxígeno, éste comenzó a aumentar en la atmósfera hasta convertirse en algo tóxico para muchas bacterias a las cuales les causó la muerte. Solo sobrevivieron las bacterias que lograron adaptarse a la nueva situación; pero no solo se adaptaron sino que el oxígeno se convirtió en algo vital para ellas. Simultáneamente, hubo una proliferación de algas eucarióticas capaces, también de realizar fotosíntesis y generar oxígeno con lo cual la concentración de este gas en la atmósfera se incrementó y posteriormente se estabilizó en un 21 por ciento.

En la actualidad, todos los animales tienen una necesidad absoluta de oxígeno para poder desarrollar su metabolismo. Los animales marinos lo obtienen de las aguas que los rodean las

que, a su vez, lo reciben de la atmósfera. Puesto que la solubilidad del oxígeno en el agua es baja, los animales acuáticos requieren, por un lado, una amplia provisión de agua recién oxigenada y, por otro, una manera eficiente de remover ese oxígeno del agua. Los animales marinos primitivos solucionaron este problema manteniendo corrientes veloces de agua a lo largo o a través de sus cuerpos y colocando virtualmente cada una de sus células en contacto directo con el agua circulante. Sin embargo, los animales marinos superiores no podían sobrevivir sin un mecanismo para extraer el oxígeno del agua circundante y distribuir este gas vital a todas las partes de su cuerpo. La evolución debió esperar a que se desarrollara este mecanismo antes de que pudieran surgir organismos más complejos. Una vez se estableció un mecanismo efectivo, la evolución posterior pudo ser rápida llegando así a producir la explosión cámbrica.

La solución clave de la evolución para el problema de la oxigenación fue la creación de un líquido interno –la sangre– que bañara todas las células del cuerpo. Gracias a este fluido, el oxígeno tomado por las células en contacto directo con el agua del mar, podía transferirse a células más profundas. La eficiencia de esta transferencia se aumentó mediante tres adquisiciones: (1) la formación de agallas, pliegues de la piel delgados y muy expandidos, que permiten un flujo de oxígeno rápido, desde el agua circundante hacia el fluido interno; (2) La adición al fluido de moléculas especiales, portadoras de oxígeno: la hemoglobina, una proteína roja que contiene hierro o la hemocianina, una proteína azul que contiene cobre; y (3) el desarrollo de una bomba, el corazón, para mover el fluido y facilitar el transporte de oxígeno.

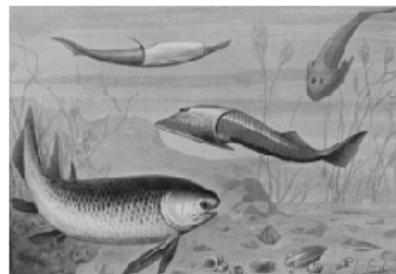
En los animales actuales se presentó una modificación anatómica que agrupó en una sola estructura los dispositivos responsables de la absorción de alimento y de oxígeno: la faringe. Esta se convirtió en una especie de colador formado por dos filas opuestas de ranuras delgadas repletas de agallas. Los animales equipados con este nuevo aparato tomaban grandes cantidades de agua por la boca que luego expulsaban por ranuras branquiales (del latín *branchia*, agalla). Las agallas absorbían oxígeno del agua que pasaba a través de ellas mientras que las partículas de comida eran retenidas por las ranuras, que servían de filtro. Esta recolección combinada de alimento y oxígeno, por filtración, es similar a la utilizada por las esponjas y medusas.

El período ordovícico

En el período **ordovícico** (hace 500-450 millones de años) aparecieron los primeros peces; todavía no había animales en tierra firme debido a la escasez de oxígeno en la atmósfera. Probablemente en esta época se formaron los primeros yacimientos de gas y petróleo.

El período silúrico

Del siguiente período, el **Silúrico** (hace entre 450 y 415 millones de años) existe un amplio registro de sedimentos marinos, en todos los continentes. Aparecieron los placodermos, los tiburones espinosos y los peces cartilagosos. Las plantas terrestres se encontraban restringidas a ambientes palustres.



Peces del Silúrico



Fósil de trilobite

El período Devónico

El **Devónico**, comprende el período comprendido entre hace 415 y 360 millones de años. En esta época, las tierras emergidas se repartieron en dos supercontinentes: Gondwana, en el sur, y Laurasia en el norte. Los tiburones primitivos se hicieron más numerosos y aparecieron los primeros peces de aletas lobuladas y los peces óseos. Surgieron los grandes arrecifes de coral, los trilobites y los amonites.



Ammonite

Los amonites fueron moluscos con una concha dividida en cámaras, cuyos fósiles son todavía relativamente fáciles de encontrar en regiones como Villa de Leiva, en el centro de Colombia. Su existencia se prolongó hasta finales de la era Mesozoica, hace unos 65 millones de años.

El período carbonífero

El **Carbonífero** comenzó hace unos 360 millones de años y terminó unos 60 millones de años después. Se caracterizó porque las primeras plantas con semilla se extendieron en tierra firme y se formaron bosques enormes que posteriormente quedaron sepultados. Además, aparecieron los primeros anfibios que se movían cómodamente entre los medios acuático y terrestre. Típico de esta era son las grandes extensiones de bosques que quedaron sepultadas, dando origen a estratos de carbón. Mientras tanto se fueron extinguiendo los peces primitivos y se expandieron los



Primeros anfibios

cartilagosos y óseos. Los anfibios invadieron la tierra firme y comenzaron su desarrollo los reptiles, que tuvieron su clímax durante el período Jurásico.

Durante el Carbonífero se formó el supercontinente Pangea; debido a la alta concentración de oxígeno en la atmósfera -que pudo llegar a alcanzar el 35%- (en la actualidad es del 20 %), abundaron los insectos, algunos muy grandes, como las libélulas, con casi sesenta centímetros de longitud, entre los dos extremos de las alas extendidas; también, aparecieron árboles de hasta 40 metros de altura.

El período pérmico

En el **Pérmico**, el clima tropical cambio a otro, con condiciones más secas y áridas. Se produjo una contracción de los pantanos. Se extinguieron gran cantidad de helechos arborescentes y anfibios, que requerían condiciones húmedas. Los helechos con semilla y los reptiles heredaron la tierra.



Pérmico: Fósil de reptil

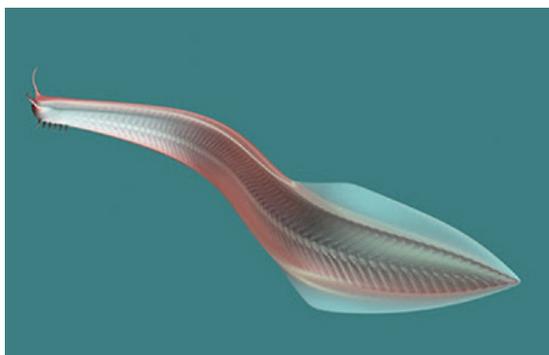
Hacia el final del período pérmico se produjo la mayor extinción masiva ocurrida en la Tierra. En ella desaparecieron aproximadamente el 95 % de las especies marinas y el 70 % de las especies de vertebrados terrestres. De modo que durante largo tiempo la Tierra sólo fue un páramo desértico dominado por los hongos. Con tan poca biodiversidad resultante, la vida tardó mucho tiempo en recuperarse.

En un espacio de tiempo relativamente corto, la evolución produjo una diversidad enorme de animales. A finales del Pérmico, cuando se acababa de formar el supercontinente Pangea, desaparecieron el 90 por ciento de las especies marinas y más de las dos terceras partes de las familias de reptiles y anfibios. Probablemente sobrevivieron los más abundantes y los que estaban más ampliamente distribuidos antes de la extinción.

Era cenozoica

La era **cenozoica** o terciaria abarca los últimos 65 millones de años, hasta el planeta que conocemos hoy. Aparecieron los mamíferos, las aves, los primates (hace unos 30 millones de años), los homínidos y el hombre actual (*Homo sapiens*), hace unos 200.000 años. La forma de vida vegetal preponderante en esta era fueron las plantas con flores y frutos que constituyeron la base de la alimentación de los mamíferos. En los bosques surgieron los tipos de árboles actuales.

Nacimiento de los vertebrados



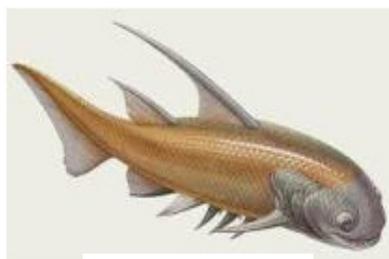
Pikaia

Hace unos 500 millones de años apareció la *Pikaia*, un animal marino, ágil y escurridizo, parecido a una hoja plateada, larga y estrecha, con una característica especial: en su dorso se desarrolló una estructura hueca, alargada y segmentada que contenía las principales partes del sistema nervioso. Esta estructura, poco a poco se transformó en columna vertebral y dio paso al soporte que un día les permitió a los animales terrestres caminar, saltar y volar.

La segmentación resultó muy ventajosa pues, aunque cada vértebra es dura y rígida, el conjunto –la columna vertebral– es bastante flexible para permitir todos los movimientos necesarios para la locomoción.

Formación de la mandíbula

Los primeros vertebrados poseían huesos cartilagosos y eran más parecidos a los gusanos que a los peces ya que no poseían mandíbulas y solo aletas rudimentarias. De acuerdo con el registro fósil, algunos eran animales extraños, de aspecto feroz, cubiertos de placas acorazadas. No poseían fauces sino solo una abertura para ingerir el alimento. A lo sumo, la boca estaba reforzada por un borde endurecido. Pero nada comparable a una mandíbula endurecida.



Acanthodius

El siguiente gran desarrollo fue la formación de una mandíbula en bisagra, probablemente a partir de arcos cartilagosos que soportaban las anteriores ranuras de las agallas. Al mismo tiempo, el cuerpo adquirió una variedad de aletas sustentadas por huesos cartilagosos y movidas por músculos. Los animales se convirtieron en nadadores poderosos y depredadores peligrosos. Es el caso, por ejemplo, de los tiburones y las rayas.

Los fósiles indican que los primeros animales en poseer mandíbulas fueron los acantodios, unos peces pequeños recubiertos de escamas óseas que vivieron en el agua dulce, hace unos 440 millones de años.

La invención de la mandíbula se extendió con gran éxito a los tiburones y a otras formas nuevas que estaban emergiendo. Estos temibles depredadores –los tiburones- aparecieron hace 390 millones de años (160 millones de años antes que los dinosaurios) y todavía circulan en nuestros mares, sin haber cambiado notablemente. De modo que sus mandíbulas, formadas de sustancia cartilaginosa, nos muestran las que tenían nuestros antepasados hace 400 millones de años.

Observando las fauces de un tiburón se puede ver claramente que las mandíbulas no son otra cosa que la transformación de las branquias. Todavía hoy las mandíbulas del tiburón no están soldadas con el cráneo, cosa que puede verse cuando el tiburón ataca y aferra una presa con los dientes: las mandíbulas se desplazan lentamente hacia adelante para la dentellada. Solo más tarde, en otros peces, las quijadas se fundieron con el cráneo y se unieron fuertemente mediante una articulación ósea.



Lampreas
(No tienen mandíbulas)

Las mandíbulas eran poco funcionales sin los dientes. Estos aparecieron poco después, a partir de la piel, o por modificación de algunas de las escamas óseas que revestían el cuerpo.

Los peces se dividieron en dos clases: los carentes de mandíbula o agnatos y los mandibulados. De los primeros son ejemplo las actuales lampreas.

Los peces con mandíbulas se subdividieron en dos grupos, según el tipo de aletas: unos poseían aletas con radios (como un abanico), sobre los cuales se extendía la piel; otros poseían aletas lobuladas (en forma de ondas), más gruesas y constituidas por piel, huesos y músculos.

Los peces con aletas radiadas regresaron al mar, convirtieron los pulmones en vejigas natatorias y dieron lugar a los teleósteos, a los cuales pertenecen la mayor parte de los peces óseos modernos. Hay más especies de peces óseos que de los demás vertebrados juntos. Gran parte de su éxito se debió a la transformación del pulmón en vejiga natatoria con la cual estos peces pueden permanecer en equilibrio, a cualquier profundidad, con solo variar la presión de los gases. En cambio, las rayas y los tiburones debieron aprender a nadar sin descanso para mantenerse a flote, con el consiguiente desperdicio energético. La evolución posterior de estos peces los regresó al antiguo esqueleto cartilaginoso, mucho más liviano que el óseo.

Los peces con aletas lobuladas tuvieron un éxito mucho menor; sobrevivieron tan solo a través de los peces pulmonados y unas cuantas formas marinas reliquias. Sin embargo, estaban

provistos de soportes óseos en el interior de las aletas, a partir de las cuales aparecieron los extremos de los demás vertebrados. Los primeros anfibios surgieron de un grupo primitivo de peces con aletas lobuladas y de esta forma todos los vertebrados de cuatro patas (tetrápodos) y sus descendientes evolucionaron también a partir de ese grupo de peces desaparecidos. O sea que no solo descendemos de los peces sino que lo hicimos a partir de los más desafortunados.

Condiciones para el desembarco de los vertebrados

El desembarco en tierra firme no fue inmediato después de la adquisición de la mandíbula sino que hubo que esperar a que se presentaran ciertos acontecimientos favorables para poder hacerlo:

- Durante más de 3.000 millones de años la vida solo se desarrolló bajo la superficie del agua donde los animales estaban protegidos de las radiaciones ultravioletas emitidas por el Sol. Para poder desembarcar en tierra firme fue necesario que primero se acumulara bastante oxígeno en la atmósfera de la Tierra hasta que en sus capas superiores se formara el escudo de ozono que protegiera la vida de las radiaciones ultravioletas solares.
- Los animales debieron acostumbrarse a respirar fuera del agua lo que implicaba hacer llegar hasta la sangre el oxígeno atmosférico –no el oxígeno disuelto en el agua-
- Los animales también debieron crear un mecanismo para impedir o limitar el resecamiento de los tejidos al aire libre.
- También debieron adaptar su cuerpo para moverse en tierra firme lo cual implica un esfuerzo mucho mayor que flotar en el agua.
- Por lo menos algunos animales debieron adaptarse a reproducirse lejos del agua.
- Para dar el paso del agua a tierra firme se debía disponer de alimento; los animales no podían trasladarse a vivir fuera del agua hasta que no hubiera algo que comer. Por eso, las plantas fueron las exploradoras iniciales, unos 400 millones de años antes, cuando junto con los hongos comenzaron a invadir la tierra. Luego se produjeron muchos cambios en la vegetación: de los primeros musgos se pasó a los equisetos, helechos –algunos de dimensiones impresionantes- y grandes árboles con una corteza de escamas parecidas a las de un pez. Los primeros animales que se aventuraron a salir del mar debieron desplazarse de charca en charca hasta volverse cada vez más independientes del agua. La Tierra comenzó a transformarse en un jardín lleno de cosas comestibles (vegetales e invertebrados de distinto tipo) con la ventaja adicional de que los depredadores marinos (tiburones marinos y muchos otros) no pusieron el pie sobre la superficie de la tierra.

- La salida de los peces del agua fue gradual. Debieron pasar por una etapa intermedia donde, por épocas, se disponía del agua y en otras no. Con el tiempo se transformaron en una clase especial de vertebrados: los anfibios.
- También debieron adaptarse a reproducirse lejos del agua.

Los primeros animales que se aventuraron a salir del mar debieron desplazarse de charca en charca, hasta volverse, cada vez, más independientes del agua. La tierra comenzó a transformarse en un jardín lleno de cosas comestibles (vegetales e invertebrados de distinto tipo) con la ventaja adicional de que los tiburones y otros depredadores marinos nunca pusieron el pie sobre la superficie de la tierra.

Salida del agua

Un acontecimiento evolutivo clave debió ser el desarrollo, en algunos peces, de una bolsa llena de aire y comunicada con la faringe. El aire, dentro de la bolsa, debía venir desde las agallas, transportado por la sangre. Una de las ventajas que los peces derivaron de esta bolsa fue la flotación ajustable, función que hoy cumple la vejiga natatoria. Otra ventaja fue que los peces, en forma similar a los buzos, llevaban una reserva de oxígeno que podían utilizar en caso de emergencia, cuando la concentración de oxígeno descendiera a un nivel muy bajo. En ese caso, el oxígeno se difundiría en la dirección inversa, es decir de la bolsa hacia la sangre, adaptación que abrió el camino a la respiración pues la bolsa hizo de pulmón primitivo. Esa es, probablemente, la forma en que los anfibios “aprendieron” a respirar, al mismo tiempo que conservaban la capacidad para utilizar el oxígeno disuelto.



Perioftalmo

En el mundo animal actual existen ejemplos de peces capaces de salir del agua pese a no estar dotados de pulmones; estos ejemplos pueden ilustrar sobre cómo pudo ser la salida gradual del agua. Una muestra es el perioftalmo. Este es un pez pequeño que vive en las costas de Malasia y de Indonesia; retiene agua en la boca y la agita para extraer todo el oxígeno disuelto presente en el agua. Los vasos sanguíneos que corren por la pared interna de la boca consiguen absorber este oxígeno. No es mucho pero si lo suficiente para permitir una autonomía de algunos minutos. Si al caminar, el perioftalmo consigue encontrar otra charca y absorber nuevamente el oxígeno con la boca, la autonomía aumenta. También la piel mojada puede ayudar en esta operación de absorción de oxígeno por contacto directo.

El perioftalmo consigue llevar a cabo auténticas incursiones en tierra firme (recordemos que se trata de un pez), trepando hasta los mangles, a la caza de insectos. Pero no puede vivir en ellos de manera permanente. Para poder hacerlo le hacen falta adaptaciones capaces de absorber oxígeno de modo mucho más eficaz. Le hacen falta pulmones.

Surgimiento de los anfibios



Eusthenopteron

Uno de los primeros habitantes marinos que intentó salir del agua fue el *Eusthenopteron*, un animal con marcadas características de pez, aletas natatorias y piel escamosa. Aprovechaba las aguas bajas para llegar a las charcas interiores y capturar peces sin tener que vérselas con demasiados competidores. Sus dientes agudos muestran que no era un cazador de arañas o de insectos terrestres sino un depredador de agua. Su desembarco no fue una verdadera conquista de tierra firme sino un modo de seguir viviendo en

el agua para alcanzar charcas interiores con abundante alimento, en el momento en que las aguas dulces comenzaban a sufrir una crisis ambiental. El *Eusthenopteron* y otros miembros de su familia son los progenitores de los anfibios y de otro animal que parece ser el eslabón entre los dos grupos: el *Ichthyostega*.



Ichthyostega

El *ichthyostega* era un animal de cerca de un metro de longitud. Las patas eran aún de nadador y también la cola, plana y ensanchada en forma de aleta. Pero las patas tenían una estructura semejante a la de los vertebrados terrestres, con articulaciones y estructuras óseas similares. La columna vertebral era mucho más recia y maciza, para sustentar el cuerpo fuera del agua. Los dientes eran ya los típicos de los anfibios. No tenía cuello, como todos los

anfibios, y las articulaciones estaban unidas a la columna por medio de huesos, soldaduras y ligamentos. Un andamiaje muy adecuado para la marcha en tierra. Sus ojos se adaptaron para ver al aire libre. Para proteger los ojos, se formaron las glándulas lacrimales, destinadas a humedecer los párpados y limpiar. Al vivir al aire libre adaptaron también su sentido del oído con un sistema para amplificar los sonidos. Por primera vez apareció también la lengua, perfectamente delineada que luego se convirtió en el órgano del gusto.

La piel de ichthyostega no era ya escamosa, como la del eusthenopteron, sino una verdadera epidermis, muy flexible y, sobre todo, apta para retener la humedad gracias a una capa mucosa. La respiración a través de la piel siguió siendo, durante bastante tiempo, una exigencia primaria en todos los anfibios a los que la vida semiacuática permitía evitar un posible resecamiento de la piel.

Se han encontrado fósiles de peces pulmonados de hace 370 millones de años. Algunos de ellos pertenecen a la línea de los dipnoos, antiguos peces capaces de respirar fuera del agua. Probablemente tenían dos sistemas de respiración: las branquias para el agua y los pulmones para el aire. Es posible deducirlo observando los protópteros, peces modernos que alternan estos sistemas para sobrevivir. En todo caso, los pulmones antecedieron a las patas durante casi 70 millones de años.



Protópterus

Los protópteros son peces que viven enterrados en el fango, inmovilizados en una especie de letargo, que esperan la llegada de las lluvias para “despertarse”. Pueden sobrevivir en una situación de este tipo durante meses e incluso años. Normalmente son peces que viven en agua, haciendo uso de las branquias. Pero cuando, durante la estación seca, las charcas se secan, el protóptero se enrosca en el fango y se envuelve con un revestimiento impermeable de mucosa, de modo que conserva la humedad interior. Vive respirando aire

y realizando a través de los vasos sanguíneos el intercambio de oxígeno y anhídrido carbónico. Con el regreso del agua y el despertar, recobra el uso de las branquias, igual que un pez. Pero si se encuentra en aguas pantanosas, poco oxigenadas, vuelve a salir a la superficie para respirar con los pulmones. Una adaptación que quizá refleja una antiquísima necesidad de sobrevivir en charcas que periódicamente se secaban.

Los moluscos

En algún lugar de la línea anélido-artrópodo se desprendió una rama que condujo a los moluscos. Este grupo comprende a los pulpos y calamares y a animales de concha dura como los caracoles, almejas y ostras. Algún gusano segmentado pudo producir una mutación que provocó la aparición de escamas en la espalda del animal, con la capacidad de formar cristales de carbonato de calcio, el constituyente de las conchas duras



Pulpo: un molusco

de los moluscos. Las escamas se volvieron placas duras y mineralizadas que dieron a este animal y a sus descendientes una protección adicional.

Los peces aprenden a caminar

Los peces encallados, capaces de respirar, se debieron arrastrar moviendo sus aletas, en un esfuerzo por encontrar sombra, humedad y alimento. Los más ágiles en este ejercicio fueron animales con dos aletas ventrales, redondeadas y carnosas, que podían ayudarles a arrastrarse así como a nadar. De acuerdo con el registro fósil, los peces de este tipo abundaron hace 100 millones de años y durante mucho tiempo se consideraron extinguidos hasta un día de diciembre de 1938, en que uno de ellos se enredó en una red, en las aguas de la costa de Suráfrica. A este fósil viviente se le dio el nombre de coelacanto. Catorce años después, un segundo pez de esta clase se capturó en las islas Comores, al norte de Madagascar.



Coelacantos

Los **coelacantos** son peces que viven a grandes profundidades y no utilizan sus aletas para caminar pero comparten algunos rasgos con los antiguos peces pulmonados de agua dulce y de aletas redondeadas que invadieron los pantanos poco después de que lo hicieran las plantas. Estos peces, gracias a una sucesión de mutaciones al azar, convirtieron las aletas en patas articuladas. Estas patas no representaban una ventaja en un medio acuoso pero, en la tierra eran valiosas adquisiciones.

El primer pez definitivamente tetrápodo (con cuatro patas) fue **acantostega**; todavía poseía branquias de manera que no podía vivir en tierra pero había desarrollado una especie de mano o pata con ocho dedos que utilizaba para desplazarse sobre la arena o el lodo del fondo del agua. Recientemente se descubrió el fósil de libonia que se puede considerar el eslabón entre pez y tetrápodo.



Acontostega

Estas adaptaciones fueron graduales y ocurrieron primero en zonas que, como los bordes de las costas y pantanos, aún se encontraban expuestas a inundaciones intermitentes. La mayoría de los animales acuáticos, con excepción de los vertebrados inferiores, desarrollaron soluciones de uno u otro tipo a los problemas que representaba la vida sobre la tierra.

De las tres condiciones esenciales para pasar del agua a la tierra –respiración, estructuras de sostén y reproducción– los anfibios habían desarrollado las dos primeras; para la reproducción seguían comportándose como peces. Es decir, en el momento de reproducirse volvían al agua, depositaban los huevos y hacían crecer su prole, dotada de branquias, en un ambiente completamente acuático. Por tal razón, un anfibio no podía alejarse demasiado del agua. Dependía, para su reproducción y para no morir desecado, de la proximidad de los pantanos, lagos y cursos de agua.

Los anfibios prosperaron en esos días pero también muchos se extinguieron. Algunos de los sobrevivientes, como los tritones y las salamandras conservaron la cola de sus antecesores marinos mientras que otros, como los sapos y las ranas, conservaron este apéndice solo en el estado larval que es natatorio y similar a los peces. La atrofia de la cola y la aparición de cuatro patas son los cambios más sobresalientes que acompañaron esta transformación.

Tienen huevo

Los animales conquistadores de tierra debieron resolver también el problema que representaba la reproducción en un medio diferente al agua. La mayoría no lo hicieron y conservaron las costumbres de sus antepasados acuáticos. Como el agua se encontraba disponible por todas partes, depositaron sus huevos allí y estos dieron lugar, en primaria instancia, a larvas nadadoras.

Luego, hubo un extenso período que comprendió miles de años, en el cual predominó la sequía permanente y el frío invernal. Las exuberantes selvas de helechos y licopodios se marchitaron, los pantanos se secaron y los animales marinos acostumbrados al suave y cálido ambiente de las lagunas y mares tropicales se extinguieron en proporciones catastróficas. Sin embargo, como ya había sucedido otras veces, la vida se recuperó. Las plantas con semillas se tomaron los fríos y secos pantanos que habían quedado desiertos ante la casi total desaparición de las plantas con esporas. Por otro lado, algún anfibio desarrolló el equivalente animal de la semilla: el huevo lleno de fluido.



Salamandra

En ciertas salamandras pequeñas, se puede observar que depositan sus huevos tanto en el agua como fuera de ella, aunque siempre en un medio húmedo. Es posible que algún antiguo anfibio comenzará del mismo modo, depositando sus huevos en puntos menos accesibles a los depredadores –la tierra firme en esa época era más segura.– De esta costumbre

pudo nacer el verdadero paso del agua a la tierra: el huevo amniótico. Es decir, una cabina especial que permitía a las crías desarrollarse también en un ambiente hostil. Fue la forma de lograr que el renacuajo se desarrolle siempre en un ambiente acuático –una charca privada, en miniatura, dentro de cada huevo- pero transportable a tierra firme.

Dentro del huevo, el renacuajo se pudo alimentar, descartar los desechos e intercambiar gases (oxígeno y anhídrido carbónico) con el exterior gracias a la porosidad de la concha. Pudo, además, continuar desarrollando las branquias –algo que se produjo también en los reptiles y parcialmente, en los mamíferos y el hombre- y estuvo, por último preparado para entrar en el mundo de la respiración.

La genialidad de la invención del huevo fue, por tanto, que el embrión siguió desarrollándose, como antes, en un ambiente líquido. Lo que se modificó fue el huevo que se volvió más grande y rígido.

Aparecen los reptiles

Con el nacimiento del huevo nacieron también los reptiles que dominarían la tierra, las aguas y el cielo durante 200 millones de años. Los reptiles ya no tenían la necesidad de mantener la piel húmeda; la respiración era ahora totalmente pulmonar y no existía el riesgo del resecamiento, como en los anfibios. Incluso estar al sol era una ventaja porque la temperatura externa ayudaba a la interna. Los reptiles lograron la verdadera independencia del agua.

Los reptiles reemplazaron a los anfibios en muchos lugares y se desarrollaron y diseminaron ampliamente. Algunos produjeron especies que perdieron las patas, aun cuando seguían siendo terrestres; otros, como lo hacen hoy en día las tortugas, retornaron al agua para vivir pero salían del agua para poner sus huevos exponiendo a sus crías a inmensos peligros. Sin embargo, la transición entre anfibios y reptiles es poco clara. Hay un animal que los paleontólogos consideran como posible eslabón de unión entre ambos mundos: el *Hylonomus*. Sus restos se encontraron en el interior de troncos rellenos de limo. Mide unos 30 centímetros de largo y se asemeja mucho a una lagartija, con una cola delgada y con unos dedos alargados y flexibles.

Parece que *hylonomus* fue el primer vertebrado completamente terrestre, es decir un animal que ya no era dependiente del agua, sino que estaba totalmente adaptado a la vida en tierra firme. Sus pulmones se habían desarrollado a tal punto que no precisaban de una respiración suplementaria a través de la piel; además, y lo principal, su reproducción ya no se realizaba en el agua sino en la tierra.

Era mesozoica

Al período comprendido entre hace 225 millones de años y 65 millones de años se le conoce como **era mesozoica** (meso = medio) y comienza con el rompimiento del supercontinente Pangea. Mientras existió este supercontinente todas las formas de vida pudieron extenderse en competición y contacto directo con otras formas de vida terrestres. Pero cuando Pangea se fraccionó en continentes separados, en cada uno de ellos la evolución operó de manera distinta. Las formas de vida se diversificaron siguiendo distintas vías en continentes diferentes, hasta que se transformaron en nuevas especies.



Dinosaurio

Un grupo de reptiles fue especialmente afortunado en cuanto a su expansión en varios nichos ecológicos: los dinosaurios (dinosaurio viene del griego que significa lagarto terrible). La historia de la vida animal en el Mesozoico es, en esencia, la historia de los dinosaurios, animales muy diversos y, algunos de ellos de tamaño gigantesco: en Argentina se encontraron los restos fósiles de quizás el dinosaurio más grande que haya existido, el *Argentinosaurus huinculensis*, con un peso calculado de unas 90 toneladas. Para los científicos es un misterio cómo se podía desplazar un animal tan pesado: según sus cálculos, los huesos de los muslos de las patas traseras que eran las que sostenían el peso del cuerpo, se debían quebrar al andar.

Una de las principales características de los dinosaurios era la propiedad de tener las patas situadas en posición vertical por debajo del cuerpo, como los mamíferos, y no hacia los costados, como la mayor parte de los reptiles. Los dinosaurios fueron reptiles originalmente bípedos, aunque el cuadrupedismo resurgió en varios grupos distintos.

Desaparición de los dinosaurios

Tan espectacular como el gran tamaño que llegaron a alcanzar algunos dinosaurios fue su enigmática desaparición hace 65 millones de años. Aunque los dinosaurios no fueron las únicas víctimas de esta destrucción –no sobrevivió ningún animal terrestre de más de 25 kilogramos– si fueron los más sobresalientes. También desaparecieron muchos otros animales como los moluscos de concha en espiral llamados amonites. Las plantas de flor también se vieron muy disminuidas siendo reemplazadas durante algún tiempo por helechos. Se han propuesto muchas hipótesis para explicar la súbita desaparición de tantas especies animales y vegetales.

La más aceptada es la formulada en 1978 por el físico Walter Alvarez y su hijo. Ellos encontraron que una delgada capa de rocas sedimentarias, depositadas en el momento de la extinción, contenía veinte veces más cantidad del raro elemento iridio que las capas vecinas. El iridio es más abundante en los materiales cósmicos que en la Tierra. Los Álvarez sólo encontraron una explicación para el exceso de iridio: un inmenso asteroide de unos diez kilómetros de diámetro cayó sobre nuestro planeta hace 65 millones de años. La zona probable del impacto, de más de 300 kilómetros de diámetro, se ha localizado en Chicxulub, sobre la costa norte de la península mexicana de Yucatán, en una región donde los mayas desarrollaron su civilización mucho tiempo después.

Se estima que el asteroide viajó a unas 40 veces la velocidad del sonido y su impacto liberó el equivalente de 100 millones de megatonnes de energía, es decir unas 10.000 veces la energía que liberarían todas las bombas atómicas del mundo si explotaran todas al mismo tiempo. Es la mayor cantidad de energía que se ha liberado en nuestro planeta desde hace 65 millones de años. Feroces hogueras destruyeron la vida animal y vegetal de grandes zonas de los continentes y durante años, nubes de polvo, humo y hollín taparon el Sol. Sin luz solar la fotosíntesis de las plantas se detuvo con lo cual disminuyó la producción general de alimento. Un período de frío penetrante (invierno de impacto) fue seguido por un inmenso calentamiento debido al efecto invernadero causado por los gases emitidos. El calor generado en la atmósfera por el choque debió elevar la temperatura hasta niveles que posibilitaron la combinación del nitrógeno y el oxígeno del aire para formar óxido nítrico. Este, al combinarse con el agua, produjo ácido nítrico: una verdadera lluvia ácida que envenenó las aguas; motivos más que suficientes para provocar una tragedia. De lo anterior se desprende que las especies no sólo deben estar bien adaptadas sino que, además, deben tener buena suerte para poder sobrevivir.

Con el impacto de este asteroide y la consecuente extinción de los dinosaurios terminó la era mesozoica.



Fósil de Archaeopteryx

Los dinosaurios van al cielo

Los animales más grandes que vuelan son las aves, consideradas el último legado de los dinosaurios, antes de desaparecer. Las aves surgieron hace unos 150 millones de años, como lo reveló el famoso *Archaeopteryx*, un fósil descubierto en 1861, en una cantera de Solnhofen, Alemania. Este fósil proporcionó a los paleontólogos la prueba más concluyente de que las aves evolucionaron a partir de los reptiles. El esqueleto de *Archaeopteryx*

es idéntico al de un pequeño dinosaurio, con una cola muy larga y dientes pero también con plumas y alas impresas en la piedra. Las plumas convirtieron al reptil en ave. Están hechas de queratina, una proteína presente también en el pelo, los cuernos, las uñas y las escamas.

Los descubrimientos de hace una década de nidos en Mongolia y en Montana (EEUU) revelan que ciertos comportamientos de las aves ligados a la reproducción se habían originado ya en los pterosaurios. Estos dinosaurios no ponían muchos huevos a la vez, como hacen los reptiles sino que – a manera de las aves- iban llenando poco a poco el nido, huevo a huevo, en el transcurso de varios días.

En 1997 se encontraron en la provincia de Liaoning, en China, un grupo de fósiles de dinosaurios, en muy buenas condiciones y con una característica especial: tenían plumas. El primer fósil encontrado, el *Sinosauropteryx*, del tamaño de un pollo, tenía estructuras ramificadas y desparramadas emergiendo de su piel.



Fósil de *Sinosauropteryx*

El fósil más reciente corresponde al de un dinosaurio con plumas asimétricas, o sea aptas para volar, algo que se consideraba exclusivo de los pájaros. De lo anterior se concluye que las plumas para volar se desarrollaron antes de la aparición de las aves, por un plegamiento de la piel que se alargó para formar una especie de tubo el cual se constituyó en el germen de la pluma. Antes de que desarrollaran el vuelo, las plumas ya cumplían otras funciones. Quizás, la principal, como aislantes térmicos para evitar la insolación o, por el contrario, para conservar el calor y la energía internas.

La imagen que proyecta *Archaeopteryx*, con músculos pectorales poco desarrollados, ausencia de un anclaje firme para las plumas principales y pulmones propios de reptil, es la de un mal volador. Sin embargo, el plumaje perfectamente desarrollado nos asegura que el animal volaba.

Sobre la forma como comenzaron a volar las aves hay dos hipótesis. La primera es que los antecesores de las aves se subían a los árboles y se lanzaban desde las ramas. La uña afilada y curvada del dedo posterior sugiere que *Archaeopteryx* podría haber sido capaz de agarrar objetos y colgarse de las ramas de los árboles. Estos proporcionan una plataforma para el lanzamiento, en especial para cierto planeo. Como las plumas



Fósil de Pluma

adquirieron con el tiempo mayores dimensiones, aumentó la resistencia al aire y la capacidad de aleteo lo cual amortizaba los aterrizajes. Sin embargo, en los ambientes donde se hallaron fósiles de este animal no había plantas que se elevaran más de unos pocos metros. Tampoco *Archaeopterix* dispuso de una amplia membrana que conectara los brazos y las extremidades posteriores y facilitara la planeación.

Otra hipótesis sobre el inicio del vuelo, sostiene que los dinosaurios corrían por el suelo y extendían sus brazos para mantener el equilibrio mientras cazaban insectos o huían de sus depredadores. La presencia de plumas rudimentarias podría haber expandido la superficie del brazo y haber mejorado la capacidad de sostenerse en el aire. Las plumas de mayor talla habrían reforzado esta capacidad, hasta la adquisición gradual del vuelo sostenido. Esta hipótesis está respaldada por el hábito terrestre de los pterosaurios, los antecesores inmediatos de las aves, que presentaban los caracteres necesarios para altas velocidades: eran pequeños, activos, ágiles, ligeros, de largas piernas y buenos corredores. Como eran bípedos, sus brazos quedaban libres para el desarrollo de la capacidad de aleteo. Sin embargo, lo más probable es que los antecesores de las aves despegaran desde el suelo o se lanzaran desde alturas accesibles (promontorios, rocas o árboles caídos).

La disposición de los huesos indica que el músculo responsable de la agitación y elevación del ala durante la batida no estaba ni en *Archaeopterix* ni en otras aves primitivas en la posición que hoy ocupa, por lo cual estas aves serían voladoras inexpertas incapaces de aletear con la celeridad y la precisión de los pájaros actuales.

Los artrópodos y su desembarco en tierra

Los **artrópodos** (del griego *arthron*, articulación y *pod*, pie) son el grupo más grande de animales que hoy habitan la Tierra; de sus antecesores se conoce muy poco. En el agua se encuentran los crustáceos (cangrejos, langostinos y similares) y en la tierra las arañas, los escorpiones, las garrapatas, los ciempiés y el inmenso grupo de los insectos.



Artrópodos

Después de estar protegidos por una envoltura a prueba de agua y equipados con patas funcionales, los artrópodos llevaban las de ganar aunque sus frágiles agallas no les garantizaban la resistencia a la desecación. Lo que ayudó a los artrópodos a utilizar el oxígeno y a su desembarco en tierra fue la formación de unos delgados tubos en su caparazón: las tráqueas.

Estos débiles conductos de aire desarrollaron muchas ramificaciones que penetraron todas las partes del cuerpo. Así, fue posible que el oxígeno se difundiera en los tejidos y que el dióxido de carbono saliera de ellos.

Posiblemente, los primeros artrópodos y, en general, los primeros animales que desembarcaron en tierra firme fueron los ciempiés, hace unos 400 millones de años; en 2004 se encontró en Escocia el primer testimonio fósil de un ciempiés de un centímetro de longitud y 428 millones de años. Sus restos son muy abundantes, señal de un éxito rápido y creciente.

Uno de los problemas del desembarco fue el de la reproducción. Y la razón es la misma que la de los vegetales: la falta de agua. En el mar, las corrientes y el ambiente líquido favorecen el transporte y el encuentro entre espermatozoides y huevos pero en tierra firme no ocurre lo mismo: la fuerza de la gravedad hace caer todo al suelo. Los ciempiés encontraron una solución eficaz: depositar directamente sus espermatozoides dentro del cuerpo de la hembra. De esta forma se suman varias ventajas: en primer lugar se resuelve el problema del encuentro casual, muy difícil en tierra firme. Aquí, la entrega es directamente a domicilio. Además, se resuelve el problema del momento adecuado para la fecundación del huevo. En efecto, los espermatozoides encerrados en una bolsita no fecundarán inmediatamente al huevo sino que quedarán a disposición para ser utilizados en el momento en que el huevo sea depositado sobre el terreno.

En algún lugar de la línea anélido-artrópodo se desprendió una rama que condujo a los moluscos. Este grupo comprende a los pulpos y calamares y animales de concha dura como los caracoles, almejas y ostras. Algún gusano segmentado pudo sufrir una mutación que provocó la aparición de escamas en la espalda del animal, con la capacidad de formar cristales de carbonato de calcio (el constituyente de la concha dura de los moluscos). Las escamas se volvieron placas duras, mineralizadas, que dieron a este animal y a sus descendientes una protección adicional.

Las alas de los insectos

Los animales más pequeños que vuelan son los insectos; pero nadie sabe cómo obtuvieron sus alas las libélulas, las abejas, los mosquitos y otros insectos voladores. A diferencia de las alas de otros animales voladores, las de los insectos no son miembros modificados. Están formados por dobleces externos y aplanados de quitina, el mismo material de la cubierta del dorso del animal y movidas por músculos



*Insectos primitivos
fossilizados en ambar*

muy eficientes. Se supone que las alas de los primeros insectos tuvieron solo una función térmica: aumentar la cantidad de radiación solar recibida y, probablemente, son una transformación de las antiguas branquias de artrópodos acuáticos.

Los mamíferos

A lo largo de cien millones de años, los dinosaurios compartieron la tierra con los mamíferos, un grupo de animales pequeños, del tamaño de una rata -o tal vez menos- activos y con pelaje, que andaban entre las malezas.

Los dinosaurios, grandes y fuertes, desaparecieron mientras que los mamíferos persistieron. Es posible que la supervivencia de los mamíferos se debiera precisamente a su tamaño pequeño que les permitía disponer de más lugares donde refugiarse y con poblaciones mucho mayores que los hacía más resistentes a la extinción. La talla pequeña quizá no fuera una adaptación positiva para los mamíferos, sino síntoma de su incapacidad permanente para penetrar en los territorios de los dinosaurios dominantes.



Purgatorius

La historia de los mamíferos es casi tan larga como la de los dinosaurios pero muy difícil de reconstruir porque los huesos de estos animales, muy pequeños y frágiles, a diferencia de los dinosaurios, se perdieron en gran parte. Pero aunque sean muy fragmentarios, han permitido deducir que estos animales vivían emboscados, se alimentaban de insectos y eran muy pequeños. El *Morganucodon*, por ejemplo, era de unos diez centímetros de largo (de menor tamaño que los escorpiones de la época) y era semejante a un ratón aunque su esqueleto era distinto. El *Purgatorius*, que se considera uno de los antepasados de los primates (y, por tanto, del hombre), se calcula que pesaba solo 20 gramos (lo mismo que una cajetilla de cigarrillos).

Muchas de las posibles características de los mamíferos primitivos se han deducido a partir de los restos de dientes. Los dientes son la parte que más se conserva en la fosilización y a muchos de estos pequeños mamíferos se les ha puesto un nombre que termina en “odon” (diente). A veces, de todo el animal, no queda más que algún pequeño fragmento de mandíbula o algún diente; pero los dientes tienen la ventaja de contar muchas cosas, más que cualquier otra parte del esqueleto; describen, por ejemplo, el tipo de alimentación y, por tanto, ciertos comportamientos relacionados con la misma y el grupo evolutivo al que pertenecen. Se sabe

que los cuatro tipos de dientes que ahora poseemos los humanos –molares para triturar, premolares, caninos para romper y desgarrar e incisivos para cortar- viene ya, desde esa misma época. En comparación, la dentadura de los anfibios y de los reptiles, salvo las diferencias en tamaño, está constituida por dientes cónicos sin mayor diseño. La especialización y diferenciación dentales, pese a sus ventajas, tuvo una consecuencia negativa: la dificultad de estar reemplazando las piezas averiadas por lo cual los mamíferos optaron por desarrollar piezas dentales permanentes, después de pasar por una fase corta de dientes provisionales o dientes de leche, que prestaban el servicio mientras los maxilares y el cráneo completaban su desarrollo.

La desaparición de los dinosaurios les permitió a los mamíferos ocupar nuevos espacios y nuevos nichos y, sobre todo, lograr lo que no había sido posible en los millones de años anteriores: aumentar de tamaño. Los mamíferos se volvieron cada vez más grandes (a veces gigantescos) y evolucionados y se convirtieron en los nuevos dominadores del planeta.

Los primeros mamíferos ponían e incubaban huevos. Descendían de los reptiles y el paso del huevo a la placenta debió haber requerido tiempo y varias fases antes de producirse. Sin embargo, los distintos eslabones de esta cadena de cambios desaparecieron; en el curso de casi 190 millones de años de evolución aparecieron una gran cantidad de mamíferos y los que hoy existen sobre la Tierra pueden dar sólo una pálida idea de los “modelos” del pasado. En la actualidad, disponemos de algunos ejemplos que pueden ayudarnos a comprender el proceso evolutivo del huevo a la placenta:



Ornitorrinco

El ornitorrinco, un mamífero australiano, es un animal con pico aplanado (como de pato) pero con pelo, que pone huevos, exactamente como un reptil, y los incuba, pero tiene glándulas mamarias, situadas en el abdomen, que producen leche.

El equidna, presente también en Australia, es semejante a un erizo, con un largo hocico en forma de pico y un tupido pelaje; no sólo produce leche con la que nutre a sus crías, una vez salidas del huevo, sino que posee un “repliegue” en la zona ventral en el que guarda los huevos antes de que se abran, llevándolos consigo como hace el canguro y, por tanto, también incubándolos mientras se mueve.

El canguro, también australiano, tiene un inicio de embarazo “placentado” pero las crías nacen cuando son poco más que embriones, para ir a colocarse en el saco ventral y completar su maduración en el exterior, chupando la leche materna. Es el modelo marsupial.

Finalmente los placentados, desde el ratón al hombre, realizan hasta el final un embarazo interno dando vida a un individuo completo que luego amamantan.

La primera transformación importante en el ascenso hacia el mamífero fue el cambio de posición de las extremidades respecto al tronco. De la vida arrastrada del reptil se pasó a la erguida del mamífero. Las extremidades, en vez de proyectarse horizontalmente hacia los lados, como consecuencia de haber sido en sus inicios aletas de pez, se proyectaron verticalmente hacia abajo y se responsabilizaron de soportar el peso del animal, avance que les permitió una locomoción descansada y eficaz.

Origen de algunos mamíferos

Hace unos 35-40 millones de años aparecieron los lobos, antepasados de los perros y también las mangostas y los felinos. Más tarde hicieron su aparición las hienas.

La evidencia del ADN indica que todos los gatos proceden de un predador similar a la pantera que vivió en el Sudeste de Asia hace unos 10.8 millones de años. Los gatos migraron a los nuevos continentes y desarrollaron nuevas especies. Un diminuto gato salvaje del Cercano Oriente fue domesticado hace entre 8.000 y 10.000 años.

El caballo actual, que tanta importancia tuvo en la historia del hombre, apareció en las praderas norteamericanas hace dos millones de años, casi al mismo tiempo que el *Homo habilis* en África. Eran caballos bastante parecidos a los actuales aunque algo más pequeños y robustos. Sin embargo, su historia comenzó hace unos 50 millones de años con el *Eohippus* (el caballo de la aurora), un animal de tamaño pequeño –como el de un perro- que vivía en las selvas y poseía ya el aspecto equino característico. En el curso de 50 millones de años hubo una transformación gradual de los huesos, con una reducción progresiva de algunos dedos, lo que permitió al caballo adaptarse mejor a la carrera. En América del Norte estos caballos desaparecieron para siempre pero, antes, algunos llegaron a Asia, a través del estrecho de Behring, y se extendieron por todas partes. A América regresaron mucho después, en el siglo XVI, en las carabelas de los conquistadores.



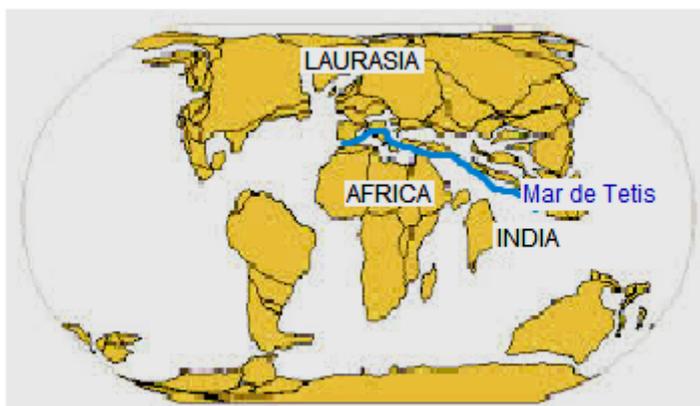
Comparación entre el tamaño del caballo actual y el tamaño del caballo primitivo

El regreso al agua

Hasta mediados del siglo XIX se pensó que las ballenas, delfines y marsopas, a los cuales en la actualidad se les conoce como cetáceos, eran peces. Sin embargo, Darwin consideró que unos animales de sangre caliente, que respiran aire y que alimentan a sus crías con leche, debían agruparse dentro del grupo de los mamíferos. No fue fácil para los biólogos aceptar como mamíferos a unos animales que carecen de piel y de miembros traseros, ineptos para vivir en tierra y, por si fuera poco, incapaces de tomarse un sorbo de agua dulce.

El estudio de los fósiles de cetáceos poco permitió avanzar en el estudio sobre los orígenes de las ballenas. De los pocos restos conocidos, ninguno estaba suficientemente completo o era muy primitivo como para permitir aclarar este asunto. Por otro lado, las ballenas se han desarrollado en los océanos en donde se dispone de poca información. Sin embargo, en las tres últimas décadas muchas de las piezas de este rompecabezas comenzaron a encajar. Los paleontólogos encontraron ricos yacimientos de fósiles de ballenas pertenecientes a la época del Eoceno, hace entre 55 y 34 millones de años, cuando las ballenas arcaicas o *arcaeocetos*, hicieron su transición de la tierra al mar. También se encontraron fósiles del Oligoceno, cuando aparecieron los modernos órdenes de cetáceos, los *misticetos* o ballenas barbadas y los *odontocetos* o ballenas dentadas. Este material fósil, junto con los análisis de ADN de los animales vivientes, permitieron a los científicos establecer cuándo, dónde y cómo las ballenas evolucionaron a partir de sus ancestros terrestres; ésta es, quizás, la más profunda metamorfosis evolucionaria que se recuerde.

Adicionalmente, los estudios inmunológicos mostraron, con sorpresa, que las ballenas estaban estrechamente relacionadas con los mamíferos que disponen de cascos o *artiodáctilos*, un grupo que incluye a los camellos hipopótamos, cerdos y rumiantes como las vacas. ¿Fueron las ballenas artiodáctilos o descienden de un antepasado común a los artiodáctilos y las ballenas? Con base en el análisis dental de los pocos fósiles conocidos de ballenas y de su comparación con los dientes de unos carnívoros antecesores de los artiodáctilos parece que la segunda hipótesis es la correcta.



Mar de Tetis, hace unos 300 millones de años

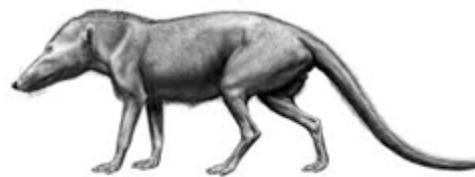
¿Qué provocó que las ballenas volvieran al mar, unos 300 millones de años después de que los primeros vertebrados se establecieron en tierra firme? La configuración de la corteza terrestre en la época del eoceno (hace entre 55 y 34 millones de años), cuando las ballenas volvieron al mar, nos da una pista al respecto. En esa época, un mar llamado Tetis se extendía desde España hasta Indonesia. Aunque los continentes y las placas oceánicas ya tenían más o

menos su forma actual, India flotaba sin dirección, Australia todavía no se separaba completamente de la Antártida y grandes extensiones de África y Eurasia permanecían sumergidas bajo el mar de Tetis. Estas aguas calientes y poco profundas acumularon bastantes nutrientes y peces. Además, los grandes reptiles marinos se habían extinguido junto con los dinosaurios de modo que había alimento suficiente, sin competidores a la vista. No era posible imaginar mejores condiciones para invitar a un mamífero a volver a la vida acuática.

Ballenas que caminan

En 1977, P. Gingerich, paleontólogo de la Universidad de Michigan, fue a Pakistán en busca de mamíferos terrestres del Eoceno y visitó un área que se suponía guardaba restos de estos mamíferos pero sólo encontró fósiles marinos. Aunque lo parezca, no es sorprendente encontrar trazas de vida oceánica antigua en Pakistán, lejos de la costa del país actual. Durante el Eoceno, el vasto mar de Tetis cubría gran parte de lo que ahora es el subcontinente indio. Entre aquellos restos el equipo de Gingerich descubrió dos fragmentos de pelvis que parecían provenir de bestias relativamente grandes que caminaban.

Dos años más tarde, en el norte de Pakistán, en las colinas al pie del Himalaya, el grupo de Gingerich encontró un fragmento de un cráneo de una criatura del tamaño de un lobo, en compañía de restos de mamíferos de 50 millones de años de antigüedad, con algunas características en sus oídos que son propias de los cetáceos y no aparecen en ningún otro vertebrado. El grupo había descubierto la ballena más primitiva bautizada luego como *Pakicetus*. Su nombre indica que fue encontrada en Pakistán y que está considerada en el grupo de los cetáceos. No lejos de allí, y en forma casi simultánea, otro grupo encontró más restos de *Pakicetus*.



Pakicetus, primera ballena
longitud: 1.75 m

El *Pakicetus* era un mamífero del tamaño de una vaca pero con unas articulaciones completamente distintas a las de una vaca. Parecían más bien las aletas de un pez. Por eso, en sus movimientos en tierra era bastante torpe. Sin embargo, cuando se introducía en el agua sus movimientos eran bastante más ágiles y seguros. Era evidente que se había adaptado mucho más al mar que a la tierra. Tenía una temible hilera de dientes con los cuales capturaba sus presas en el fondo del mar.

En 1983, Gingerich no pudo volver al norte de Pakistán debido a la invasión soviética a Afganistán por lo cual decidió trasladarse a Egipto, a unos 150 kilómetros al suroeste de El Cairo. Como Pakistán, mucho del Egipto actual estuvo sumergido bajo el mar de Tetis. Hoy, los esqueletos de criaturas que nadaron en el antiguo mar se encuentran enterrados en la arena del desierto. Uno de esos esqueletos, de entre 40 y 37 millones de años de antigüedad, corresponde a una ballena de unos 18 metros de longitud, con cabeza armada de dientes, de miembros traseros menudos y cuerpo de serpiente marina, conocida como *Basilosaurus*. Era la primera evidencia de un cetáceo con patas. Gingerich llegó a la conclusión que era un descendiente de *Pakicetus* pero unos diez millones de años más reciente.

En 1992, otro grupo recuperó, en rocas marinas del norte de Pakistán, un esqueleto que se puede considerar intermediario entre las ballenas modernas y sus ancestros terrestres. Tenía pies grandes y una cola poderosa -lo cual sugería que era un buen nadador- pero también huesos fuertes en las patas y codos y muñecas móviles lo que sugería habilidad para desplazarse en tierra. Se le denominó *Ambulocetus natans* para indicar que era una ballena que caminaba y nadaba.

Los *Pakicetus* y los demás cetáceos primitivos, con cerca de 140 géneros fósiles encontrados, dieron origen a los mayores animales que hayan existido nunca en el planeta, como el cachalote azul, de 30 metros de largo y 130 toneladas de peso, capaces de sumergirse a una profundidad de más de mil metros y resistir hasta 40 minutos debajo del agua.

“Querido: descendemos del mono! Esperemos que no sea cierto; pero si lo fuera, recemos para que no se entere todo el mundo”

Esposa del obispo de Worcester, en Inglaterra, después de la publicación del “Origen de las especies” de Darwin

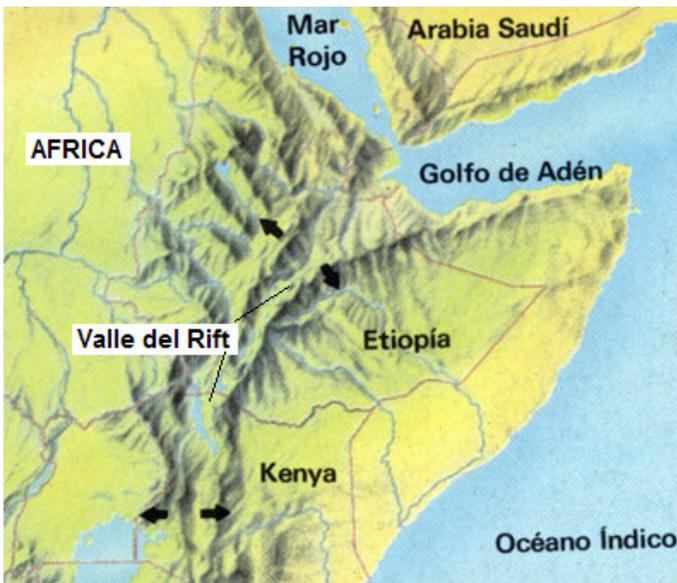
11. El Planeta de los Simios

La “fractura” de África

En 1871, Charles Darwin predijo que los ancestros más primitivos de los humanos se debían encontrar en África, donde nuestros primos chimpancés y gorilas viven todavía. Hoy, esa predicción es aceptada por todos los paleontólogos pero restringida a África Oriental.

Hace unos 180 millones de años, Pangea, el supercontinente único de la Tierra, se dividió en dos continentes: Laurasia y Gondwana. Posteriormente, Gondwana se fracturó y dio origen a África y América del Sur. Debido a los movimientos de la corteza terrestre –la tectónica de

placas- África se desplazó hacia el noreste y se unió a Eurasia (Europa y Asia) con lo cual se generó un puente natural de tierra que separó el Mar Mediterráneo del Océano Índico y permitió el paso de África a Asia y Europa. A la parte oriental de Eurasia se unió, a su vez, el subcontinente indio.



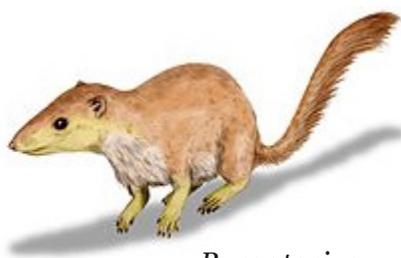
Valle del Rift, en África

Hace unos quince millones de años *Procónsul*, o alguna forma semejante de prosimio aprovechó inmediatamente ese puente y comenzó a viajar, difundiendo su descendencia primero por Europa y más tarde por Asia.

Hace unos diez millones de años tuvo lugar, como consecuencia de los movimientos tectónicos, una “fractura” longitudinal de África. A lo largo de esta grieta, denominada “Rift”, la tierra se elevó, aumentó la actividad volcánica en esa región y se produjeron consecuencias climáticas muy importantes: mientras el oeste siguió siendo forestal, la zona oriental se hizo más árida a causa de las transformaciones producidas por las masas de aire. Se considera que en la parte occidental boscosa se desarrollaron los simios (chimpancé y gorila) mientras que en la zona árida de la sabana, en Africa Oriental, surgieron las primeras formas de homínidos. Fue en esta zona donde al mismo tiempo que ocurrían las transformaciones geoclimáticas se producía la bifurcación entre los antepasados de los grandes simios (chimpancés, gorilas y orangutanes) y los homínidos, con esta última rama desembocando en el hombre actual.

Entre los grandes simios, el chimpancé es el más relacionado con el hombre mientras que los otros dos grandes antropomorfos, el gorila y el orangután, son primos más distantes, desde el punto de vista evolutivo.

Los primates



Purgatorius

Un grupo de reptiles dio origen a los mamíferos. Estos permanecieron pequeños y oprimidos por los grandes reptiles – los dinosaurios- durante casi 150 millones de años. Para escapar de los dinosaurios, muchos mamíferos debieron volverse nocturnos y refugiarse en los árboles dando origen a los primates, de los cuales forma parte el hombre –*Homo sapiens*-.

Los primates poseen cerebros grandes, ojos localizados en el frente de la cara, uñas en vez de garras y habilidad para asir y saltar.

Probablemente el antepasado común de los humanos y chimpancés (nuestros parientes vivos más cercanos) fue un cuadrúpedo. Uno de los mamíferos que se desplazó a los árboles, hace unos 70 millones de años –época de los dinosaurios- fue el *Purgatorius* (llamado así porque se encontró por primera vez en una colina denominada Purgatorio, en Montana (Estados Unidos), una especie de ardilla pequeña, que se alimentaba de hojas, cortezas y cereales. El *Purgatorius* pudo ser el fundador de la línea evolutiva que llevó a los primates y al hombre. Muchos rasgos que son característicos de los primates (visión binocular, rostro corto, manos prensiles, aumento del tamaño del encéfalo y de la capacidad de vigilancia) resultaron quizá de su adaptación a la vida arbórea.

Recientemente los paleontólogos descubrieron un esqueleto casi completo, de una criatura del tamaño de un ratón, de hace 55 millones de años, conocida como *Carpolestes simpsoni*. Al igual que los primates modernos, *Carpolestes* tenía dedos largos, uñas y un dedo oponible, bueno para asirse a las ramas de los árboles; pero, a diferencia de los primates actuales, los ojos estaban posicionados lateralmente y las piernas estaban adaptadas para trepar, no para saltar. Sin embargo, una vez que los primates tuvieron la capacidad de asirse a las ramas terminales de los árboles, los ojos se fueron desarrollando hacia el frente de la cara lo cual facilitaba la caza de los insectos que pululaban alrededor de las flores, frutos, gomas y néctares que las plantas ofrecían.



Carpolestes



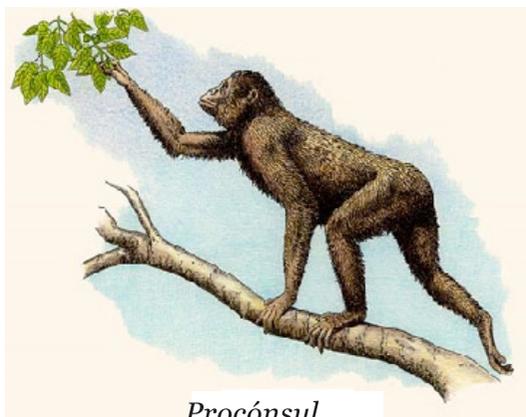
Dryopithecus

Los primates más avanzados evolucionaron hacia un grupo de animales diversos que parecieron ramificarse en direcciones muy distintas y a los que se denominó *dryopithecus* (del griego *pithecus* que significa simio). El nombre les fue dado por Edoard Lartet, un abogado y paleontólogo francés, basado en una mandíbula de primate hallada en un terreno arcilloso de los Pirineos franceses. Por lo que se puede deducir de su esqueleto y dientes, los *dryopithecus* vivían en la selva, comían frutos, hojas y retoños blandos, flores y, probablemente insectos. El fósil más antiguo pertenece a un *dryopithecus* procedente de Egipto -denominado *Aegyptopithecus*- en una zona que hoy es desértica pero que hace unos 30 o 40 millones de años estuvo poblada por una selva exuberante. Era un cuadrúpedo terrestre, ágil, trepador, herbívoro, con un tamaño más o menos el de un zorro, con nariz y boca alargadas, una cola larga y un cerebro del tamaño de una bola de ping pong. Simultáneamente en Asia, en los bosques lluviosos de Borneo y Sumatra, se desarrolló el *Sivapithecus*, probable antepasado del orangután actual.

En años recientes, los investigadores han hecho una serie de descubrimientos notables que pueden unir la brecha entre los humanos y sus antepasados simios africanos. Estos fósiles, con un rango de antigüedad entre los cinco y los siete millones de años, están cambiando las ideas existentes sobre cuándo y dónde surgió nuestro linaje y cuál fue el último ancestro común a humanos y chimpancés.

El ser insectívoros obligó a los primates a mantener una postura erguida. La captura de insectos mientras estaban suspendidos precariamente de las ramas de los árboles determinó que la mano sufriera una serie de adaptaciones para volverse más eficiente. Así, el dedo pulgar se volvió oponible lo cual facilitó agarrar las ramas y las presas; los extremos de los dedos prensiles se recubrieron de uñas en lugar de garras, con lo cual las terminaciones nerviosas llegaron hasta el límite lo cual les confirió a los dedos gran sensibilidad y convirtió a las manos en otro órgano sensorial.

Los fósiles más antiguos de simios procedentes del este de África, que en ese tiempo era una isla, se asignan al género *Procónsul*. Este nombre –antes de cónsul- se creó en 1933, en recuerdo de un famoso chimpancé del zoológico de Londres, llamado Cónsul que se ponía la gorra, montaba en bicicleta y fumaba pipa.



Procónsul

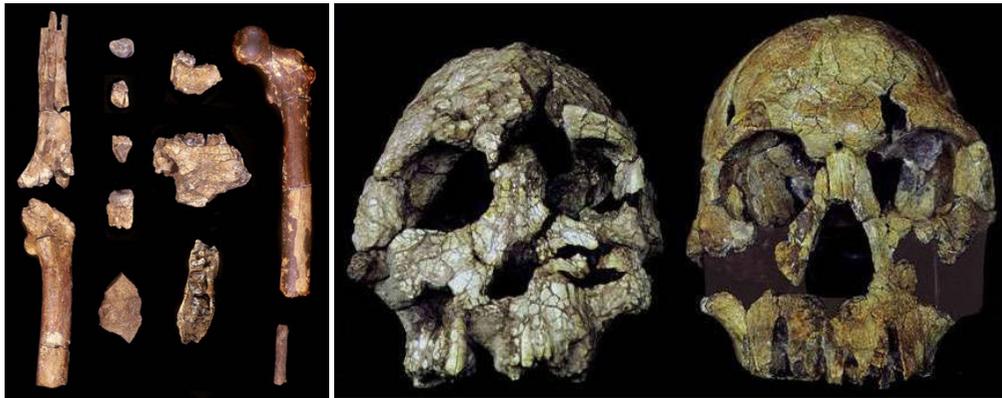
Se considera que *Procónsul* fue el antepasado común de los grandes simios y de los seres humanos. Andaba sobre sus cuatro patas, a lo largo de las ramas de los árboles, con movimientos lentos y cautelosos. Como los monos actuales, carecía de cola y estaba más adaptado a vivir en la punta de los árboles que a colgarse o balancearse entre las ramas.

Para saltar de rama en rama era muy importante tener una buena visión. La preponderancia de la vista disminuyó la importancia del olfato y así el hocico se redujo de manera considerable. Al disminuir la distancia y los obstáculos entre ellos, los ojos pudieron ver simultáneamente el mismo objeto. Surgió así la visión binocular que trajo como consecuencia la visión tridimensional. Al tener un par de ojos que apuntan en la misma dirección pero separados por una pequeña distancia, se pudo tener una sensación de espacio y profundidad muy útil para unos animales que se desplazaban de un árbol a otro y para quienes un error de apreciación, a grandes alturas, podía ser fatal. El mayor uso de los ojos, las manos y los pies exigió, también, un mayor esfuerzo de coordinación lo cual, probablemente fue la causa del aumento del tamaño del cerebro que terminó por superar al de todos los demás mamíferos de ese período.

Muchos de los descendientes de estos primates primitivos adoptaron un régimen diurno, con una dieta a base de frutas. Este cambio exigió la capacidad de diferenciar los colores para poder localizar y distinguir los frutos maduros, con más facilidad. La capacidad de percibir

los colores es común a todos los vertebrados y depende de los conos, unas células especiales localizadas en la retina del ojo. Sin embargo, esa capacidad se puede perder en los animales de vida nocturna.

Simultáneamente, el clima terrestre comenzó a enfriarse lo que llevó a una reducción continua de las extensas selvas tropicales. Varias especies pasaron de un continente a otro con lo cual se produjo una explosión de cambios evolutivos puesto que los animales se encontraron con nuevas oportunidades y nuevas competencias. Aparecieron nuevas especies y otras se extinguieron.



Restos fósiles de Orrorin tugenensis

A mediados de 2001, los paleontólogos M. Pickford y B.Senu, del Museo de Historia Natural de Paris, encontraron en las colonias Tugen, en Kenia, unos fósiles de una criatura de seis millones de años de antigüedad, que ellos llamaron *Orrorin tugenensis*. Según los descubridores, de acuerdo a las características del fémur, cuando *Orrorin* estaba en el piso caminaba en dos pies. Además, exhibía otras características que claramente lo ubican dentro de la familia homínido.

En otros aspectos, *Orrorin* fue un animal primitivo: sus dientes caninos eran grandes y puntiagudos con relación a los caninos humanos y sus brazos y los dedos de las manos mantenían adaptaciones para trepar.

Un descendiente africano del *Procónsul* dio origen a los *Ramapithecus* (de Rama, un poema épico de la India) que se extendieron por Europa y Asia, desde Hungría hasta China y Pakistán. Estos animales pesaban unos 20 Kg, tenían brazos largos, piernas cortas y unos molares más anchos y planos y unos incisivos más pequeños que los *dryopithecus*. Este tipo de dientes es característico de los animales que deben triturar más que desgarrar, por lo cual se supone que la comida de los *Ramapithecus* debió ser más dura y menos nutritiva que la de los *dryopithecus*. Los *Ramapithecus* debieron pasar de la selva donde había alimentos blandos (abundantes frutas y hojas) a un bosque más claro donde ya no se disponía de estos alimentos.

La línea que, con el tiempo, conduciría hasta el hombre descendió de los árboles al suelo de los bosques para pastar y cazar, cuando se presentaba la oportunidad; se debió asentar en el límite de los bosques con acceso a zonas más o menos abiertas.

La adaptación persistente a un hábitat terrestre condujo a la postura erecta.

Los 70 millones de años de evolución de los primates han estado marcados, entre otras cosas, por el aumento del tamaño del cuerpo. Paralelamente ha habido un progreso notable en la inteligencia y los primates, además, han desarrollado un grado más complejo de comportamiento social. Con todo, quizás la característica más notable de los primates, en especial de los más desarrollados, es el oportunismo. La supervivencia depende básicamente, de mantener una provisión continua de comida nutritiva y los primates más desarrollados, como los chimpancés, explotan toda fuente adecuada de comida que encuentran.

Bipedismo (posición erguida)

La adopción de la marcha en dos pies (bipedismo) se considera el paso crucial en la historia humana, a pesar de que los humanos no son los únicos animales o mamíferos capaces de andar sobre sus extremidades posteriores. Todas las aves, cuando se posan en el suelo, caminan sobre dos patas. El avestruz y los pingüinos son permanentemente bípedos. Los canguros son bípedos que usan la cola como contrapeso. Gatos, perros, osos, caballos, elefantes y primates de diferentes tipos son capaces de ponerse en dos patas y caminar durante períodos cortos. Pero las adaptaciones que sufrieron esos animales para llegar a la postura bípeda fueron diferentes a la de los humanos.

Hay muchas hipótesis sobre los orígenes del bipedismo humano: para tener acceso a alimentos que antes eran inalcanzables, para transportar la comida, para usar instrumentos, para ver por encima de la hierba alta, para recoger bayas de lo alto de los arbustos, para parecer más altos y temibles a los adversarios, por un cambio de dieta, para seguir a la manada durante las migraciones, para exhibir los atributos sexuales, para tirar piedras, para poder estar de pie en el agua, para poder regular mejor la temperatura corporal al exponer menos área superficial al sol abrazante de África, etc. La lista es larga pero no está todavía claro el motivo; de pronto, pudo haber varios motivos simultáneos. Lo que si es claro es que el bipedismo no apareció de pronto. No es posible que, por una mutación casual, apareciera, de repente, un individuo que en vez de caminar en cuatro patas hubiera comenzado a caminar erguido.

Es una transición demasiado compleja que afecta a muchas estructuras, tejidos y órganos como para que cambiaran juntos, al mismo tiempo.

Adaptación del cráneo

Si se comparan el cráneo de un perro con el de un hombre es claro que se debieron dar cambios profundos para pasar de la posición horizontal a la vertical.

El cráneo del hombre tuvo que cambiar su “punto de engarce” para poderse colocar en lo alto de la columna vertebral. El orificio occipital (la abertura del cráneo en que se apoyan las vértebras cervicales y por el que pasa la médula espinal) se tuvo que trasladar exactamente debajo del cráneo mientras que en todos los cuadrúpedos está situado en la parte de atrás. Esta es una característica muy útil para comprender, en presencia de unas pocas piezas fósiles, si se trata o no de una criatura erguida (un chimpancé tiene el orificio occipital a mitad de camino entre el de un cuadrúpedo y el nuestro.).

La nueva posición del cráneo implicó otros cambios: por ejemplo, un reajuste de los músculos de la nuca y también de los huesos ya que los músculos no tenían por qué ser tan potentes para sostener el cráneo. Con la nueva posición bípeda disminuyó, por consiguiente, la exigencia que tienen los cuadrúpedos de contar con fuertes crestas óseas en la parte posterior del cráneo.

Las extremidades

Del mismo modo se pueden apreciar las profundas modificaciones sufridas por la pelvis. Para permitir una mayor sujeción de los músculos del glúteo y su mejor engarce en el fémur, las “alas iliacas” de la pelvis giraron hacia adelante y se ensancharon mientras que el resto de la pelvis se acortó. Así, toda la estructura adquirió un aspecto típico de platón. En esa estructura, ausente en todos los simios pero presente en los homínidos, caben todas las vísceras que, con la posición erguida comenzaron a pesar. Esto supuso resolver un nuevo problema: a falta de cuatro patas, todo el peso se descarga a lo largo de la columna vertebral y de las piernas y los pies.

En consecuencia, la columna vertebral desarrolló una serie de curvas para hacerse más elástica y poder responder así a las diversas exigencias del bipedismo. El hueso sacro, en donde concluye todo el peso del tronco, se acortó y se ensanchó. Los pies, por su parte, adoptaron, por debajo, una forma de arco (siguiendo, en cierto modo, el principio de las ballestas de un camión) para amortiguar el apoyo.



*Astrágalo y otros
huesos del pie*

El pie sufrió otras modificaciones importantes. Aparte del incremento de tamaño de un hueso especial –el astrágalo– que recibe todo el peso del cuerpo, apareció otra diferencia típica entre el hombre y los simios: el pulgar ya no se encuentra separado de los otros dedos, como si lo está en la mano. Como ya no es necesario moverse por entre los árboles, ya no es necesario que los pies se agarren a las ramas; es decir, el pie perdió su función prensil. El pulgar del pie adquirió una nueva función en el bipedismo: el impulso. Para conseguirlo tuvo que

unirse al resto del pie y ensancharse de forma que pudiera responder a todas las exigencias de la marcha o de la carrera.

Por último, las piernas. Los humanos poseemos fémures más largos y gruesos que los de un gorila, precisamente porque somos los únicos primates que los usamos con tanta intensidad. En términos biológicos, se puede considerar que somos animales especializados en el bipedismo al igual que un pájaro está especializado en volar o un canguro en saltar. El fémur, por tanto, tuvo que sufrir muchas modificaciones, la más típica de las cuales es su inclinación respecto al eje del cuerpo. El ser insectívoros obligó a los primates a mantener una posición más erguida. La captura de insectos mientras estaban suspendidos precariamente de las ramas de los árboles determinó que la mano sufriera una serie de adaptaciones para volverse más eficiente. Así, el dedo pulgar se volvió oponible con lo cual se facilitó agarrar las ramas y las presas; los extremos de los dedos prensiles se recubrieron de uñas, en lugar de garras, con lo cual las terminaciones nerviosas llegaron hasta el límite, lo que les confirió a los dedos gran sensibilidad y convirtió a las manos en otro órgano sensorial. El bipedismo dejó las manos libres para asir y ejecutar diversas tareas con lo cual las extremidades superiores fueron ganando en agilidad y, con el tiempo pudieron realizar movimientos finos y delicados. En la mano, el dedo pulgar se opuso a los demás dedos lo cual permitió agarrar objetos y, en un momento dado, fabricarlos.

Pensamos, recapitamos y planeamos para lo cual disponemos, comparativamente, de enormes cerebros, en relación con el tamaño del cuerpo. El progreso del lenguaje permitió comunicarles a otros los descubrimientos y recibir enseñanzas de las experiencias ajenas. La visión estereoscópica permitió apreciar en profundidad. Comemos de todo y hemos llegado a todos los lugares de la Tierra; la especie humana ha revelado una capacidad extraordinaria para colonizar diferentes hábitats, cálidos o fríos, secos o húmedos, altos o bajos, marinos o desérticos. Así, nos hemos convertido en el animal grande más abundante de todo el planeta. Podemos estimar su población actual en unos ocho mil millones de habitantes con un peso

cercano a los 500 millones de toneladas (¡y aumentando!). Los únicos animales grandes que rivalizan, en número, con nosotros son los que hemos domesticado: vacas, pollos y ovejas. En contraste, hay menos de mil gorilas de montaña en el mundo. A primera vista, las diferencias con los demás animales son bastante notables. Pero, a nivel molecular, las diferencias no parecen tan claras.

Genética

Los simios –chimpancés, gorilas y orangutanes- tienen 24 pares de cromosomas y los seres humanos un par menos. La razón es que, en los humanos, dos cromosomas se han fusionado. Es decir, nosotros tenemos 23 pares de cromosomas porque el cromosoma 2, el segundo más grande en los humanos, en realidad está formado por la unión de dos cromosomas de mono.

El ADN del hombre y el del chimpancé son similares en un 99 por ciento. Algo parecido ocurre con la hemoglobina –proteína que transporta el oxígeno molecular en la sangre- y el citocromo c, una proteína, constituida por más de cien aminoácidos, que se encuentra en todas las plantas, animales y microorganismos que respiran; la diferencia entre simios y humanos es de tan solo un aminoácido. Muy posiblemente, a medida que se vaya descifrando la estructura molecular de otras proteínas, se confirme la similaridad molecular entre los monos y el hombre. En los primeros meses de vida el chimpancé tiene un perfil casi humano. Y si nos remontamos atrás, al estado fetal, el parecido es todavía mayor.

Si consideramos los organismos adultos, en los humanos –al igual que en los simios y en muchas especies salvajes- se presenta el dimorfismo sexual: los machos son más grandes que las hembras, recuerdo de una época de luchas masculinas por el derecho al apareamiento. Los hombres, en efecto, tienen un diez por ciento más de estatura y un veinte por ciento más de peso, que las mujeres.

También, como lo saben todas las madres, los niños pequeños se llevan a la boca cuanto objeto nuevo, limpio o sucio, encuentren. Es como si el bebé confiara más en la información suministrada por sus labios y por su lengua que en la obtenida por medio de sus dedos.

Más tarde, en el adulto, la lengua seguirá siendo un instrumento táctil de altísima sensibilidad y precisión, capaz de detectar y amplificar irregularidades muy pequeñas en la superficie de los objetos, cualidad que se aplica también en el juego amoroso. Esta alta sensibilidad de la

lengua y los labios se debe a que están poblados de terminaciones nerviosas, excesivas para sus funciones actuales pero que debieron desempeñar un papel muy importante en la exploración táctil de nuestros antepasados cuadrúpedos, cuando todavía las manos no se habían liberado de su tarea locomotriz. En consecuencia, es lícito pensar que la conducta de exploración oral del niño sea un recuerdo del pasado.

Lo anterior indica que la especie humana difiere de sus parientes primates vivos más por su comportamiento que por divergencias grandes en su anatomía o en la composición molecular.

Homínidos

Hace entre 22 y 5.5 millones de años, en una época conocida como Mioceno, los simios dominaron el mundo primate. Unas 100 especies de simios vagaron a través del Viejo Mundo, desde Francia hasta China, en Eurasia, y desde Kenia hasta Namibia, en Africa. Al igual que los simios actuales, estas criaturas variaban considerablemente en el tamaño: el más pequeño pesaba unos tres kilogramos (como un gato doméstico) y el más grande debía tener un peso similar al de un gorila (80 kilogramos). A partir de esta amplia diversidad surgieron los humanos y un número limitado de simios.

Los paleontólogos estiman que los homínidos difieren del hombre actual por ser más pequeños, tener una mandíbula y dientes relativamente grandes y por poseer un cerebro que, aunque mayor que el de los monos de tamaño corporal equiparable, rara vez tiene un volumen superior a la mitad del encéfalo del hombre moderno.

La principal fuerza que dirigió la evolución desde *Australopithecus* hasta las especies Homo pudo haber sido la habilidad para recorrer grandes distancias, a través de las sabanas de África, para cazar o en busca de carroña.

Hace unos 2.4 millones de años debió presentarse una mutación genética que ocasionó la disminución del tamaño de la mandíbula. Sin la incomodidad de unos poderosos músculos masticadores, el cerebro pudo crecer. Esta fue una de las características básicas que marcó la divergencia entre los humanos y los simios. En esa época, los ancestros humanos debieron comenzar a usar las herramientas de piedra para descarnar la carroña y reemplazar las enormes mandíbulas para descascarar y romper nueces.

Australopithecus



Australopithecus

A los antepasados inmediatos del género *Homo* –que incluye a nuestra propia especie *Homo sapiens*– se los agrupa en el género *Australopithecus*. Estos antiguos homínidos habitaron la Tierra hace por lo menos cuatro millones de años. Eran ya bípedos pero su cerebro no superaba significativamente al de los simios actuales. Poseían molares robustos, idóneos para una dieta de materia vegetal dura.

Cincuenta años después de la afirmación de Darwin, el anatomista R. Dart encontró en Taung, Suráfrica, un fósil perteneciente a un humano extinto que bautizó *Australopithecus africanus* (mono del Sur del África). Su hallazgo se recibió con escepticismo y con un rechazo rotundo a la posibilidad de que fuera un antepasado de los humanos. Sin embargo, el descubrimiento de otro espécimen surafricano, conocido ahora como *Australopithecus robustus* reivindicó a Dart. Sin embargo, sólo hacia la década de 1950 comenzó a aceptarse la idea de que descendemos de antiguos ancestros africanos parecidos a los monos.

Diferentes miembros de la familia Leakey han hecho descubrimientos importantes de fósiles humanos antiguos. Así, a mediados de la década de los 90, el equipo dirigido por Meave Leakey, del Museo Nacional de Kenia, anunció el descubrimiento de *Australopithecus anamensis* (de *Anam*, lago en lengua turkana), una especie de hace cuatro millones de años, que tiene características ligeramente más arcaicas que Lucy (ver más adelante) pero que puede ser su ancestro. Por la misma época, otros científicos descubrieron en Etiopía una colección de fósiles de 4.4 millones de años de antigüedad, que representan un **homínido** (un homínido es un **primate** –humanos y protohumanos– que anda erguido) más primitivo, conocido ahora como *Ardipithecus ramidus*. No obstante, los estimativos de algunos biólogos apuntan a que la separación entre humanos y chimpancés debió ocurrir antes de ese tiempo. Cada cual se adaptó a su propio ambiente pero todos fueron criaturas bípedas, con quijadas gruesas, molares grandes y caninos pequeños, radicalmente diferentes de los monos cuadrúpedos. Hace entre dos y cuatro millones de años vivió el ***Australopithecus afarensis*** (australopiteco del país de los Afar), una especie que ya se desplazaba erecta.

En 1978 y 1979, en Laetoli (Tanzania), no lejos del Parque Nacional de Serengeti, Mary Leakey encontró las huellas de pisadas dejadas por homínidos que caminaron por allí hace 3.7 millones de años. En una de sus erupciones, el volcán Sadimán, próximo a Laetoli, arrojó cenizas al aire



Huellas de pisadas de homínidos

y una lluvia las convirtió en barro, en el que se grabaron y fosilizaron las pisadas de muchos animales, entre ellos las de tres homínidos. Hay dos rastros paralelos pero el de la derecha, en el sentido de la marcha, parece corresponder a dos individuos; uno de ellos caminaba sobre las huellas del otro. El individuo de la izquierda es muy pequeño, quizás una hembra o una cría. Las características de estas huellas indican hasta en los mínimos detalles, un modo de caminar igual al nuestro.

El pie de un chimpancé, gorila u orangután es muy diferente al pie humano. En realidad se parece más a nuestra mano. Eso quiere decir que el pie es plano y su dedo gordo es más corto que los demás y se puede separar lateralmente de los otros dedos poniéndose en posición divergente al caminar. En base al tamaño de las pisadas de estos homínidos se calcula que su altura fluctuaba entre los 120 y 140 centímetros. En Laetoli también se encontró una mandíbula que es el ejemplar tipo de la especie.



Esqueleto de Lucy

En Hadar se encontraron fósiles con una edad entre tres y tres y medio millones de años. Allí, el equipo dirigido por D. Johanson descubrió, a partir de 1972, numerosos restos de *Australopithecus afarensis*. Entre estos restos se encuentra gran parte del esqueleto de una hembra de unos 20 años de edad y unos 25 kilogramos de peso, conocida mundialmente como Lucy, tal como la apodó Johanson cuando la descubrió en 1974 (la bautizó así por la canción de los Beatles “Lucy en el cielo con diamantes” que alguien estaba escuchando cuando se descubrió el fósil).

El *Australopithecus afarensis* surgió hace casi cuatro millones de años y alcanzó su esplendor medio millón de años después. Su cerebro aumentó hasta un máximo de 550 centímetros cúbicos pero seguía siendo el de un chimpancé. El macho medía alrededor de 1.20 metros y pesaba unos 50 kilogramos. La hembra era de dimensiones bastante menores. Vivieron cerca de lagunas y ríos y comenzaron a explotar su entorno, alimentándose de semillas, frutas y tubérculos. Los científicos los describen como muy primitivos del cuello para arriba, con una cara todavía muy parecida a la de un simio, con pómulos pronunciados y muy salientes en su parte inferior, pero muy modernos del cuello para abajo. La rodilla se parecía mucho a una

articulación humana; la pelvis estaba completamente adaptada para andar erguido; y el pie, que era una mezcla curiosa de antiguo y moderno, estaba estructurado adecuadamente para el bipedismo. Estos seres ya habían dado un salto evolutivo inicial importante: andaban erguidos, de lo cual se deduce que el andar erguido se produjo antes que la expansión del cerebro.

Un individuo que come mucha fruta debe saber subir bien a los árboles lo cual se ve reflejado en que los dedos del *afarensis* no eran rectos como los nuestros sino curvos; es decir, muestran una curvatura típica de los animales arborícolas. Se puede concluir, entonces, que el *afarensis* caminaba en dos pies pero también trepaba a los árboles donde encontraba una parte del alimento y quizás refugio durante la noche.

El 28 de noviembre de 1924, R. Dart, un profesor universitario de anatomía, en Johannesburgo (Sudáfrica) recibió un paquete procedente de la cantera de Taung y dentro de él había un cráneo infantil en el que Dart reconoció a un posible antepasado nuestro al que bautizó como *Australopithecus africanus*.

Los *Australopithecus africanus*, de tres millones de años de antigüedad, heredaron el nomadismo de los contemporáneos de Lucy y conquistaron tierras africanas más amplias. Físicamente no eran muy distintos de sus colegas *afarensis*; la altura era de 1.35 metros y el peso de unos 30 kilogramos. La cara era todavía muy simiesca con arcos superciliares muy acentuados y unos pómulos fuertes. Los dientes que se han encontrado de *Australopithecus africanus* (incisivos más pequeños y molares más grandes que los de *afarensis*) hacen suponer que se alimentaba de vegetales fibrosos (un poco más duros de masticar que las frutas) y también de algunas presas ocasionales. Y quizás de algunos trozos de carne arrancados a cualquier cadáver abandonado por los depredadores. Los dientes también han permitido calcular la edad de su muerte: 22 años. ¡Se moría joven en las sabanas africanas! El volumen del cráneo del *africanus* (430-500 centímetros cúbicos) era ligeramente superior al del *afarensis* por lo cual, su nivel de inteligencia pudo ser ligeramente superior. El *Australopithecus africanus* se dividió en dos subespecies, ambas extintas: *Australopithecus robustus* y *Australopithecus boisei*.

Ardipithecus

Entre 1992 y 1994 se encontraron en Aramis, Etiopía, los restos del homínido más antiguo y catalogado por algunos como el eslabón perdido: el *Ardipithecus ramidus* (*ardi* y *ramid* procedente la lengua afar y significan respectivamente “suelo” y “raíz” mientras que *pithecus* significa “mono” en griego). Se trata de una colección de huesos y dientes pertenecientes a 17

individuos, con una antigüedad de unos cuatro y medio millones de años. Del examen de los huesos se desprende que tenían una altura media de 1.20 metros y que ya eran bípedos pero, al mismo tiempo, aún ágiles trepadores. El *Ardipithecus* vivió todavía en la selva tal como lo sugiere el análisis de los sedimentos y de los huesos de los animales encontrados junto con sus fósiles. Esto sugeriría que el bipedalismo apareció en el bosque, en medio de la tupida vegetación y no en la sabana como se ha creído siempre.

Ardipithecus tenía una pelvis diseñada para caminar erguido. Las demás características eran más las de un chimpancé que las de un ser humano. Así, su cerebro era probablemente más pequeño que el de un chimpancé actual pero su dieta si debió ser similar: fundamentalmente fruta y vegetación. Los machos eran bastante más grandes que las hembras. En un momento determinado la población se dividió y quizás, por algún accidente geográfico, se separó en dos grupos, uno que dio origen a los homínidos y otro a los chimpancés.

Por su parte, el hombre actual –*Homo sapiens*– es un primate bípedo que cuando se desplaza de un lugar a otro suele acarrear herramientas, alimento y otras posesiones, ya sea en sus brazos o en recipientes. Esto no ocurre con los grandes monos. Además, los miembros de las sociedades del *Homo sapiens* se comunican mediante lenguaje hablado. Los monos, aunque se comuniquen entre sí, carecen de lenguaje.

En tercer lugar, entre los miembros de las agrupaciones sociales humanas el compartir el alimento es una forma característica de comportamiento. Los adultos intercambian el alimento y lo comparten con los jóvenes.

Sólo el hombre se alimenta de modo habitual de presas que sobrepasan los 15 kilogramos de peso y los cazadores-recolectores humanos tienden a dedicar más tiempo que los demás primates actuales a la adquisición de alimentos ricos en proteínas. Por lo general, el hombre somete los productos alimenticios a una preparación previa antes de su consumo.

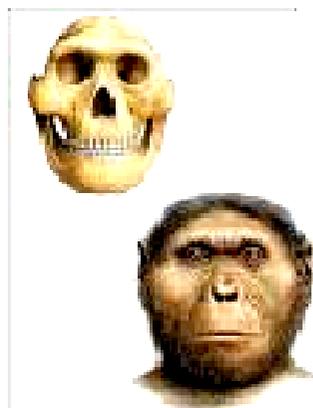
En las agrupaciones sociales humanas siempre existe un “lugar de residencia” de manera que los individuos puedan desplazarse de modo independiente por el terreno circundante y volver a reunirse más tarde. La residencia posibilitaba la división del trabajo entre hembras y machos. Los machos salían a cazar, actividad que requiere velocidad a pie (para correr detrás de la presa o delante de ella cuando falla el tiro) o movilizarse a grandes distancias, algo que las hembras adultas no podían hacer por dedicarse al cuidado de los niños. Por eso recolectaban alimento en los alrededores de la residencia, principalmente productos vegetales pero también mariscos, anfibios y reptiles pequeños, huevos e insectos.



Australopithecus boisei

Antes de la aparición del *robustus*, en un paraje menos selvático y más árido y caluroso, surgió, hace 2.6 millones de años, y se extinguió hace un millón, el *Australopithecus boisei* (*boisei* en honor a C. Boise, un hombre de negocios londinense que contribuyó generosamente a la expedición que desembocó en el descubrimiento de estos fósiles), un tipo más estilizado y versátil a la hora de alimentarse y más alto: 1.50 metros, aunque las hembras eran más pequeñas.

Era muy macizo, con una cabeza ancha, con inmensos pómulos, la nariz chata y la cara plana. Probablemente se alimentaba de frutos y raíces muy duros que debían ser triturados por los dientes durante bastante tiempo. Toda la arquitectura del cráneo y de los dientes está condicionada por la necesidad de masticar durante mucho tiempo. El volumen de sus molares era unas seis veces los nuestros. El cerebro del *boisei*, a pesar de su aspecto simiesco, alcanzó los 550 centímetros cúbicos, un volumen mucho más elevado que el de los simios antropomorfos. Los surcos y las circunvoluciones cerebrales, indicadas indirectamente por las huellas internas del cráneo, parecen mostrar un diseño mucho más complejo.

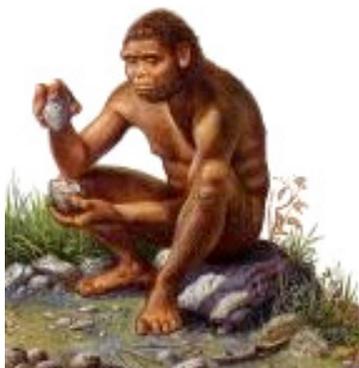


Australopithecus robustus

El *Australopithecus robustus* era un homínido de fuertes mandíbulas sujetas por músculos enormes, pero pequeño –más pequeño que los chimpancés- torpe y desadaptado, que desapareció hace 1.2 millones de años. Había perdido sus dientes caninos pero disponía de grandes molares y premolares para masticar mejor de un lado a otro, probablemente hierbas y vegetales duros. La reconstrucción de su mano indica que el *robustus* podía manejar instrumentos; su mano era muy similar a la nuestra, con dedos rectos y un pulgar grueso indicador de una fuerte musculatura y una notable capacidad de manipulación. También la muñeca tiene una movilidad y una forma similar a la nuestra. Gracias a sus manos más humanas pudieron haber construido herramientas toscas de hueso.

Homo habilis

Los primeros fósiles atribuidos a la especie *Homo habilis* fueron hallados en noviembre de 1960 por Mary y Louis Leakey, en la quebrada de Olduvai, en Tanzania. Se le denominó así, *habilis*, por su capacidad para fabricar herramientas de piedra, las cuales se encontraron junto a los fósiles. La talla sistemática de la piedra para obtener instrumentos parece haber sido una de las claves de la capacidad de nuestro género para ocupar medio ambientes muy diversos y para acceder a nuevos recursos.



Homo habilis

El *Homo habilis* apareció hace unos 2.5 millones de años. A pesar de tener una estatura análoga a la de los *Australopithecus* (1.30-1.40 metros) su cerebro si era bastante mayor (600-800 centímetros cúbicos, comparado con los 400-500 centímetros cúbicos de los *Australopithecus*). El mayor tamaño del cerebro probablemente esté relacionado con el hecho de que *Homo habilis* fue el primero de los homínidos en comer carne.

En efecto: al contrario de lo que sucede con los vegetales, para comer carne hay que atrapar las presas. Para encontrar plantas no se necesita mucha inteligencia; sin embargo, para conseguir carne hay que entrar en competencia directa con las presas (para cazarlas) o con los predadores (para robarles). Pero correr detrás de una presa demanda energía de modo que para que la caza sea provechosa, la cantidad de energía que se obtiene al comer las presas debe ser mayor que la cantidad de energía gastada en la persecución de las mismas. La inteligencia es la que hace que esto sea posible. En otras palabras, para procurarse proteínas animales hay que poseer un mínimo de estrategia, de capacidad organizativa y de flexibilidad.

Los *Australopithecus* tenían ya una mano muy parecida a la nuestra por lo que cabe pensar que dispusieran de la capacidad mental (tanto como los chimpancés) y de la coordinación necesaria para producir lascas. Si no lo hicieron es porque tal vez no tuvieron la necesidad de obtener bordes afilados para cortar. Probablemente esta necesidad surgió cuando los primeros humanos comenzaron a consumir carne y necesitaron de filos tanto para abrir la gruesa piel de grandes animales como para cortar tendones y trocear músculos; también debieron utilizar los cantos para fracturar huesos y extraer el tuétano. Los animales consumidos por los humanos no necesariamente habrían sido cazados por ellos sino que, con frecuencia, debieron aprovechar los desechos dejados por animales cazadores.

Los humanos no somos los únicos animales que utilizamos instrumentos. Los chimpancés también los usan pero se trata de objetos naturales que son adaptados para su función como es el caso de las ramitas que introducen en los agujeros del piso o de los árboles para “pescar” termitas. Una razón para que los chimpancés no puedan fabricar herramientas más elaboradas puede ser que sus manos no son muy adecuadas para manipular con precisión objetos pequeños debido al alargamiento de la palma de la mano y de todos los dedos, excepto el pulgar, cuya punta queda a considerable distancia de las de los demás dedos. Es una mano hecha para colgarse de ella y no para tallar. Sin embargo, es probable que el problema principal resida en la incapacidad para coordinar los movimientos necesarios de los brazos, muñecas y manos. Los humanos son los únicos primates que realmente fabrican instrumentos a partir de una forma que solo existe en su cabeza y que ellos “imponen” a la piedra.

Los primeros utensilios de piedra se conocen como olduvayenses (nombre derivado de Olduvai, sitio donde se encontraron los primeros fósiles del *Homo habilis*) y son muy simples. Consisten en cantos y rocas tallados sin una forma estandarizada. Se encuentran los trabajados por una sola cara o tallados por las dos caras y lascas sin retocar. El proceso de fabricación de estos instrumentos requiere secuencias de pocos golpes. También utilizaban cantos y rocas sin modificar, a modo de martillos y yunques. Estos sencillos elementos de piedra proporcionaban a sus fabricantes algo de lo que carecían a causa de la reducción de los caninos: un filo cortante.

Con la aparición del *Homo habilis* no desaparecieron de inmediato los *Australopithecus*. Ese fue un proceso más demorado. Simultáneamente vivieron en África varios tipos de homínidos; por un lado, la forma robusta del *Australopithecus* (*boisei* al oriente y *robustus* al sur), destinada a la extinción; por otro lado, probablemente, varios tipos de *Homo habilis*, de los que, sin embargo, solo uno estaba destinado a dar origen a la línea que desembocó en el hombre moderno.

Homo erectus



Homo erectus

Los últimos *Homo habilis* dieron origen, hace unos 1.8 millones de años, a un hombre mucho más moderno, que caminaba completamente erguido: el *Homo erectus*, que con 1.50 metros de estatura –e incluso más- y una capacidad craneana cercana a los mil centímetros cúbicos, comenzó a comportarse como un verdadero hombre y a mirar metas lejanas, con sus ojos todavía incrustados en arcas prominentes. Los homínidos más antiguos, entre ellos *H. habilis* y los australopitecus fueron de cuerpo y cerebro más pequeños, no mucho mayores que los de un chimpancé moderno. *H. erectus* descubrió el fuego y decidió lanzarse a la conquista de nuevas tierras, dispersándose por el continente eurasiático e inaugurando con ello una nueva etapa en la evolución humana: el desplazamiento de homínidos fuera de África y la propensión a colonizar, exclusiva de nuestra especie. Es probable que el principal interés por viajar fuera la búsqueda del alimento:

lo que un animal come determina, en gran parte, qué extensión de territorio necesita para sobrevivir. Una hipótesis es que, por poseer un cuerpo más grande, *H. erectus* necesitó una dieta de mejor calidad que incluyera carne. Eso lo obligó a ampliar sus horizontes en busca de suficiente alimento. Su búsqueda lo llevó a Eurasia.

Los investigadores proponen que solo hasta la aparición de las hachas de mano y otras herramientas de piedra construidas de manera simétrica (una cultura tecnológica sofisticada conocida como Achelense) los *H. erectus* pudieron pasar a unas latitudes más al norte. Las trazas más antiguas aceptadas de humanos, fuera de África, fueron herramientas de piedra Achelenses encontradas en Ubeidiya, en Israel. En años recientes, en Dmanisi, República de Georgia, se encontraron fósiles humanos muy bien preservados, herramientas de piedra y restos de animales con una antigüedad de 1.75 millones de años, cerca de medio millón de años más antiguos que los restos de Ubeidiya. Fuera de la inquietud, ya mencionada, de por qué los primeros humanos se aventuraron fuera de África, surgieron otras: ¿cómo lo hicieron y para dónde cogieron después? Los siguientes fósiles asiáticos, después de los encontrados en Dmanisi, tienen un millón de años de edad y los encontrados en Europa sólo 800.000 años.



Hacha achelense

Los *erectus* alcanzaron las tierras de China (en Chu ku tien, cerca de Pekín, se descubrió el mayor yacimiento conocido de *Homo erectus*), Java y Europa, en una insólita migración que debió ocurrir hace más de un millón de años. Se desarrolló de forma independiente en tres frentes. En Asia, el *Homo erectus* ensayó la navegación según lo comprueban los restos fósiles encontrados en la isla de Java, que datan de hace 800.000 años. Precisamente fue en Java que Eugene Dubois, un médico holandés, descubrió en 1892, un fémur y otros fragmentos de un homínido y pensó que había encontrado el primero de nuestros antepasados capaz de caminar erguido, el eslabón perdido entre el hombre y el mono y lo llamó *Pithecanthropus erectus* que significa “hombre simio erguido”, un apelativo que después se convirtió en *Homo erectus* cuando, en la década de 1950, los científicos agruparon al hombre de Java y al de Pekin en el mismo género.

El hombre de Pekin tuvo éxito como cazador según lo demuestran las herramientas y los restos de animales encontrados con los fósiles humanos. El uso del fuego, atestiguado por los restos de madera quemada y por cenizas, hallados junto a los fósiles, indica claramente un gran avance sobre los homínidos anteriores. Era posible que el hombre de Pekin no supiera hacer fuego sino que lo “capturara” recogiendo las brasas producidas en algún incendio natural; pero, indudablemente, sabía conservarlo. La presencia del fuego en las cavernas habitadas por *Homo erectus* suministraba luz y calor y servía para acosar y mantener alejados a los animales salvajes.

Hasta 1984, los fósiles de *erectus* eran fragmentos de cráneo; pero en ese año, un equipo dirigido por Richard Leakey desenterró el esqueleto casi completo de un niño *erectus* de doce años de edad que murió hace 1.54 millones de años cerca al lago Turkana, en el norte de Kenia. La longitud del fémur sugiere que debía medir alrededor de 1.60 metros cuando murió y que habría sobrepasado los 1.80 metros de adulto, lo cual convierte a los *erectus* en la especie homínida más alta hasta ese momento. Su altura, las caderas estrechas y su constitución física general lo hacían idóneo para perseguir a sus presas a las altas temperaturas del ecuador. Las piezas dentales y los maxilares son más pequeños que las muelas trituradoras y las fuertes mandíbulas de los australopithecus. Al ser consumidores habituales de carne, los *erectus* no necesitaban las poderosas mandíbulas que utilizaban sus antecesores para masticar vegetales gruesos y cascar nueces. La parte posterior del cráneo, donde se ubica la zona del cerebro que posibilita el sentido de la vista, es más grande que el de los australopitecos lo cual sugiere que la visión del *erectus* era más aguda. Pero el resto del cerebro del *erectus* todavía estaba evolucionando como lo demuestra el hecho de que el niño careciera de frente. Los lóbulos frontales de su cerebro, donde se produce el pensamiento complejo en los humanos modernos, eran relativamente pequeños. Un *homo erectus* adulto tenía un cerebro equiparable, en tamaño, al de un niño actual de un año de edad pero era dos veces más grande que el de un chimpancé lo cual sugiere que debía ser muy inteligente para su época.

Alguna rama de los *erectus* debió alcanzar también Europa, aunque los estudiosos no acaban de ponerse de acuerdo por dónde. Quizás por Oriente Medio o por el estrecho de Gibraltar. Los últimos descubrimientos parecen señalar que evolucionaron sorprendentemente en algunos enclaves como el norte de España, donde dieron lugar a la última especie humana descubierta, el *Homo antecesor*, bautizado así por los paleontólogos del yacimiento de Atapuerca.

El *Antecesor* tenía un rostro moderno, sin la frente huidiza. Al igual que el *erectus* practicaba el canibalismo y puede que lo hiciera con propósitos rituales. Desarrolló utensilios para trocear y cortar carne y fue buen cazador-recolector.

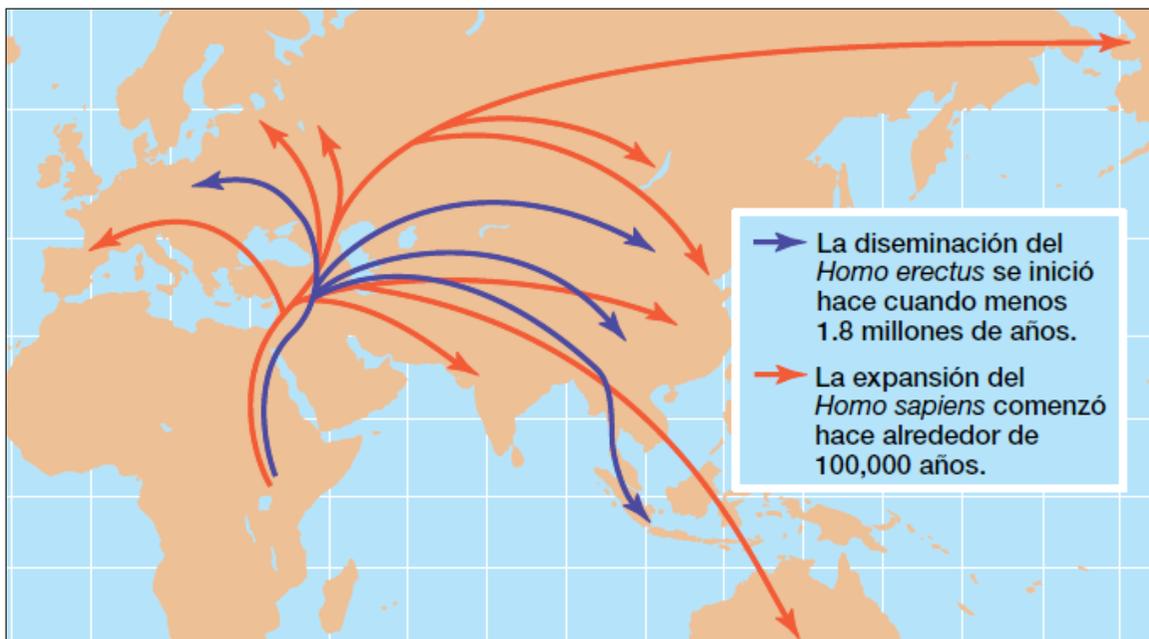
El *antecesor* constituye una incógnita monumental ya que fue el hombre más evolucionado de su época y, sin embargo, parece que no derivó en nuevos tipos humanos, pese a su avanzado comportamiento social, como causa de un lenguaje, sorprendente para entonces.

Durante casi un millón de años, el *Homo erectus* mantuvo la misma estructura física general y se adueñó del mundo pero jamás evolucionó hacia formas más desarrolladas a nivel global. El destino reservó ese privilegio a una reducidísima comunidad de *erectus* que no emigró sino que se perpetuó en el edén africano mientras sus hermanos gobernaban el resto del globo.

Es posible que, por el tamaño de su cerebro y por su incipiente cultura, el *Homo erectus* sea el primer homínido que merezca el calificativo de hombre. Probablemente, de una de las comunidades de *erectus* surgió el *Homo sapiens* hace, como mucho, 300.000 años. Todavía robusto y con protuberancias sobre las cejas, mostraba un cerebro más uniforme y adaptado para el uso de la inteligencia.

El hombre de Pekin

A 50 kilómetros al sudoeste de Beijing (Pekin), se halla una cueva situada cerca de la estación del ferrocarril de Chukutien. Allí se encuentran diversas capas con restos fósiles que indican que el hombre primitivo empezó a habitarla hace 460.000 años y la abandonó hace 230.000, cuando se vio forzado a hacerlo por el progresivo relleno de la cueva.



Desplazamiento del *Homo erectus* y del *Homo sapiens* a partir de su posible sitio de origen, el suroriente de África.

La especie de homínido que vivió allí se clasifica como *Homo erectus pekinenses* –u hombre de Pekin-. El periodo es suficientemente largo para que se puedan apreciar los cambios progresivos en la morfología de los restos fósiles; uno de los rasgos físicos más trascendental es el aumento de la capacidad craneana. Igualmente importante es la posibilidad de reconstruir determinados hechos de la evolución cultural de la especie.

Existen pruebas, en los depósitos de la cueva, de que el hombre de Pekin dominaba el fuego y lo empleaba para la preparación de su comida. La necesidad de sobrevivir durante la estación fría pudo estimular la adopción de una cueva como hogar y el uso del fuego. Los huesos de animales fósiles indican que los ocupantes de la cueva eran hábiles cazadores; la carne aporta más proteínas y calorías que la dieta vegetariana. Las semillas fosilizadas revelan otro de los componentes de la dieta.

La recolección de frutos y semillas es un trabajo simple que se puede efectuar en solitario. En cambio la caza, particularmente la de grandes presas, es tan complicada, difícil y arriesgada que resulta necesaria la intervención de muchos individuos. Se puede así afirmar que lo más probable es que cuando el hombre de Pekin se inició en la caza del ciervo, vivió en grupo y no aislado. Por otra parte, la existencia en la cueva de los restos de ejemplares cobrados indica que estos cazadores primitivos preferían transportar las presas a su vivienda y compartir con otros la comida en vez de consumirla donde se le dio alcance.

Por otro lado, la caza de animales de gran talla y de carrera rápida, como el ciervo, debió resultar difícil para las mujeres a causa de sus limitaciones fisiológicas (como la gravidez y la cría de los hijos) lo cual debió originar, o por lo menos contribuir, a la división sexual del trabajo dentro del grupo. El modelo de machos cazadores y hembras recolectoras, frecuente en las sociedades cazadoras-recolectoras actuales, se adaptó quizás ya desde esa época.

Adicionalmente, la gran abundancia de piedra tallada, informa de la destreza del hombre de Pekín en la fabricación de herramientas lo cual sugiere que debió practicarse un ejercicio primitivo de educación para que el proceso de convertir una piedra en un instrumento tosco pero especializado, se transmitiera de viejos a jóvenes, a través de las generaciones.

El hombre de Neandertal

Durante el verano de 1856, una cuadrilla de obreros trabajaba en una cantera, a orillas del río Düsel, que atraviesa el valle de Neander o Neanderthal (*thal* = valle, en alemán antiguo). A unos 20 metros de altura, sobre el río, se hallaban unas pequeñas cuevas. Para proseguir su trabajo, los obreros volaron una cueva y, al comenzar a excavar, encontraron unos huesos que echaron entre los escombros. El propietario de la cantera entregó los pocos huesos recuperados a un profesor de ciencias naturales de la localidad quien, a su vez, se los llevó a un gran experto, el anatomista H. Schaahhausen, de la Universidad de Bonn. Este confirmó que se trataba de un ser humano bastante distinto de nosotros. Quizá un bárbaro que había vivido en épocas anteriores a la nuestra. A él le sorprendieron los grandes arcos superciliares, un rasgo que entonces se consideraba exclusivo de los monos antropomorfos.

El hombre de Neardental tenía la cabeza ancha y plana, con un cráneo relativamente bajo, la frente estrecha y unos arcos superciliares prominentes. La frente se inclinaba hacia atrás en vez de elevarse de manera brusca como ocurre en el hombre moderno, de cara más aplastada. Para algunos, estos rasgos son una reminiscencia del *Homo erectus*, del que, casi con seguridad derivaron los neardentales. La nariz también era prominente y ancha y, probablemente, su gran tamaño le servía para calentar el gélido y seco aire que respiraba.

En base al análisis de sus dientes se puede afirmar que los neandertales no estaban especializados en triturar semillas y granos sino más bien en una dieta a base de carne que podía proporcionar más calorías en las regiones árticas donde vivían. Los arcos dentales estaban muy desplazados hacia delante lo que les permitía usar la boca como una especie de tenaza para mantener tensa la carne que querían cortar (quizás la carne la ablandaban masticándola durante mucho tiempo) y para trabajar las pieles y mantener tensos o inmóviles los objetos.

Según las reconstrucciones realizadas, el neandertal debía tener una estatura de 1.55-1.65 metros; probablemente en Oriente Medio eran un poco más altos. Su constitución era bastante robusta, con huesos grandes y una musculatura muy potente. Los huesos de las piernas eran algo arqueados. Las piernas y los antebrazos eran más bien cortos, lo cual acentuaba su aspecto rudo y robusto. Su fuerza debía ser notable. El brazo y la mano también eran extremadamente potentes. Probablemente el macho y la hembra neandertales fueron mucho más fuertes que la mayoría de las personas actuales y bastante rechonchos lo cual, probablemente, les ayudaba a soportar mejor el frío. Efectivamente, los cuerpos bajos pero fuertes y las piernas relativamente

cortas son adecuados para los climas fríos porque presentan menos superficie por unidad de volumen de la que perder calor. La protección contra el frío puede explicar también la prominencia facial de los neandertales. La mayor separación entre las fosas nasales y el órgano del olfato, habría permitido que mediara más tiempo para que el aire helado se calentara antes de llegar a las regiones del olfato sensibles a la temperatura.



Hombre Neandertal

Los neandertales, nuestros parientes prehistóricos más cercanos, dominaron Eurasia durante casi 200.000 años. Los científicos calculan que en el apogeo de su ocupación de Europa occidental, su número nunca superó los 15.000 individuos.

¿De dónde procede el Neandertal? Hace entre 400.000 y 100.000 años el *Homo erectus* aceleró su transformación hacia el *Homo sapiens* con un volumen cerebral cada vez mayor. Esta evolución hacia individuos más inteligentes ocurrió simultáneamente en África, Europa y Asia pero mientras en África dio paso al proceso que llevó al *Homo sapiens sapiens*, en Europa originó el Neandertal cuya estirpe, según estudios sobre el ADN, se separó de la nuestra hace medio millón de años, para no volver a juntarse más. En la actualidad se considera al hombre de Neandertal como una especie extinta del género Homo que habitó Europa y partes de Asia occidental desde hace 230 000 hasta 28 000 años atrás.

¿Por qué el mismo tronco –*Homo erectus*- dio origen a dos ramas diferentes (*Homo sapiens* y neandertales)? La razón son las grandes variaciones ambientales y climáticas. Mientras en África, origen de los *sapiens*, el clima era tropical, el norte de Europa, asentamiento de los neandertales, sufrió una terrible glaciación (conocida como Riss) que se extendió desde hace 250.000 años hasta hace 125.000 años y que ocasionó que una extensa franja territorial quedara sepultada bajo la nieve –en ciertas zonas del actual Reino Unido, los glaciares alcanzaron los dos kilómetros de espesor-. Los bosques desaparecieron y, con ellos, los animales que los habitaban. Lógicamente también el hombre sufrió las consecuencias de este trauma ambiental y, de alguna manera, provocó que en Europa, 150.000 años después imperara el Neandertal.

Vida y muerte del neandertal

La evolución del *Homo sapiens* conllevó una expansión considerable del cerebro –en el neandertal el volumen cerebral promedio debió ser de unos 1.500 centímetros cúbicos, un volumen superior al del hombre actual- lo cual se reflejó en su modo de vivir. Para empezar, algunas de las poblaciones de Neandertal se trasladaron a partes del globo a las que ningún homínido se había aventurado a ir antes y donde el frío era muy intenso; por ejemplo, el norte de Europa y las montañas alpinas. Esas regiones estaban cubiertas de nieves y glaciares por lo cual la vegetación era escasa. Los neandertales se vieron obligados, entonces, a obtener el alimento fundamentalmente de la caza. Y fueron cazadores hábiles. Y también diestros constructores de herramientas: convertían fragmentos de sílex en rascadores, puntas, cuchillos y hojas. Se especializaron en cazar caballos, animales que podían proporcionarles hasta 200 kilogramos de carne. Por lo menos parte de la carne la asaban al fuego directo.

Cuando la madera escaseó o faltó, como suele ocurrir en la tundra desprovista de árboles, emplearon huesos de animales para edificar sus refugios y también para quemar en sus hogares. Es posible, además, que rompieran los huesos largos para extraer la médula y que acompañaran

sus comidas con nueces y avellanas. En todo caso, la única fuente posible de azúcares debió estar constituida por frutos y tubérculos. Los neandertales también practicaron el canibalismo como otra fuente de alimento o como parte de un ritual mortuorio, lo cual presupone un desarrollo cultural avanzado.

Los neandertales dejaron pruebas de que se ocuparon de los cadáveres (fueron los primeros en hacerlo) y quizás también de buscarle un significado a la muerte. Hace 100.000 años comenzaron a enterrar a sus muertos lo que significaba que eran conscientes de la diferencia entre la vida y la muerte y, muy probablemente, practicaban rituales mágicos o religiosos. Por todo el territorio que ocuparon hay restos de individuos jóvenes y viejos que fueron enterrados de forma deliberada y casi reverencial. En Le Mousier, se bajó un joven a un hoyo, acostado sobre el lado derecho y con la cabeza apoyada sobre el antebrazo, como si durmiera. Un montón de nódulos de sílex le sirvió de colchón y junto a su mano se encontró un hacha de piedra delicadamente labrada. Estaba rodeado de huesos de animales salvajes lo cual induce a pensar que junto a él quizás se enterró carne para que le proporcionara sustento en el viaje a una nueva vida. En la cueva iraquí de Shamidar, el análisis de los sedimentos que rodeaban los restos de un cazador inhumado hace unos 70.000 años muestra una insólita concentración de pólenes reunidos en grupos lo cual indicaría la presencia de ramos de flores.

La práctica de enterrar a los muertos y la costumbre de los neandertales de vivir en cuevas eliminó las principales causas de destrucción de los huesos (debida a animales de paso, sol, lluvia, pisoteo, erosión, etc.) y permitió que sus fósiles se conservaran en relativo buen estado hasta nuestros días.

Los neandertales llevaban una vida social muy activa para lo cual debían comunicarse entre sí; pudo ser mediante gestos aunque las bases morfológicas del lenguaje ya estaban desarrolladas.

La sociabilidad que habían desarrollado se puede tipificar en dos ejemplos: (1) en una cueva croata se encontró un fragmento craneal que revela una herida grave en la cabeza de un neandertal, la cual había sanado; alguien debió cuidar de la víctima durante mucho tiempo. (2) En la cueva Chapelle-aux-Saints, en Francia, se encontraron los restos de un hombre anciano con solo dos dientes; este anciano solo no habría sobrevivido si los demás no le hubieran ayudado con comida y con cuidados constantes.

Entre los objetos hallados en los yacimientos neandertales hay algunos extraordinarios: son objetos inútiles pero que sirven de testimonio del nacimiento de lo bello y de lo curioso.

Recolectar y, en un algún momento, fabricar algo que no sirve para cortar, partir, cazar o alguna otra función útil sino que tiene un puro valor estético, es la señal de que algo está cambiando en el cerebro.

Los neandertales vivieron durante un período muy breve -50.000 años- y desaparecieron hace unos 30.000 años. Durante ese período existieron tres especies humanas diferentes sobre la faz de la Tierra que ocupaban regiones diferentes. En Europa, el Cercano Oriente y Asia Central vivían los neandertales, en Java los últimos representantes de *Homo erectus* y en África seres humanos como nosotros, es decir de la especie *Homo sapiens*. Hace 20.000 años solo quedaban los humanos modernos que se encontraban también en el territorio habitado hasta entonces por las otras dos especies. ¿Qué ocasionó la desaparición de los neandertales? Hay varias hipótesis al respecto pero no hay una respuesta clara.

El *Homo sapiens sapiens*

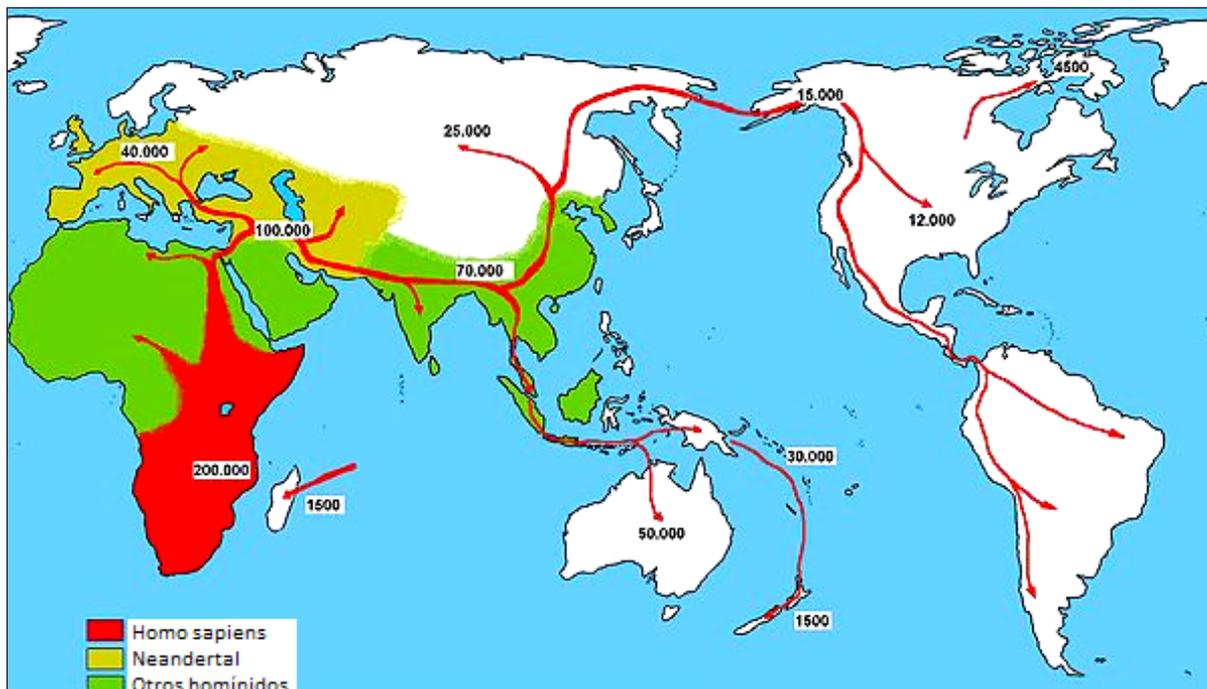
Hace más de 100.000 años, quizás incluso 130.000, circulaban ya por África formas arcaicas de *Homo sapiens sapiens*, o sea individuos que pertenecían al grupo del hombre moderno. Es difícil decir de qué parte del árbol genealógico salieron estos antiquísimos *sapiens sapiens*; por ahora, no hay elementos suficientes para reconstruir de modo preciso su recorrido evolutivo. Pero no es difícil suponer que derivarían de formas de *sapiens* arcaicos que aparecieron en África hace ya bastante tiempo. Estos primeros *sapiens sapiens* presentan ya las características inconfundibles del hombre moderno, tanto en la conformación del cráneo como en la estructura de la cara y en el volumen cerebral; un volumen que supera los 1.300 centímetros cúbicos para llegar, en poco tiempo, hasta los 1500. Es decir, a nuestras dimensiones.

Entre 1960 y 1980, se encontraron en una cueva en Jebel Qafsefh, Israel, 16 ejemplares de *sapiens sapiens*, con una antigüedad de 92.000 años, en lo que constituye quizás el hallazgo más importante de este tipo. En esta cueva se encontraron las primeras sepulturas humanas descubiertas hasta ahora, mucho más antiguas que las de los neandertales y ricas ya en ritualismo.

Los cráneos de Qafsefh indican claramente que ya no tenían nada que ver con los *erectus* (ni con los neandertales); la frente era alta, el rostro pequeño, el mentón prominente y había desaparecido la gruesa “visera” supraorbital. Y la capacidad craneal era de unos 1500 centímetros cúbicos. La fisonomía general era ya la nuestra.

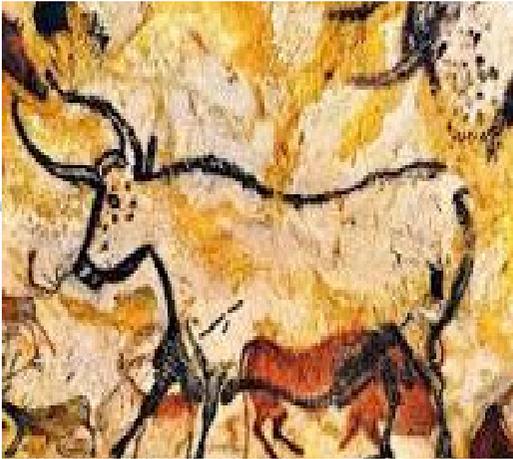
Hace unos 60.000 años comenzó, a partir del África, una expansión de *Homo sapiens sapiens* que se dividió en dos troncos principales. Un tronco se dirigió al sureste y alcanzó, hace unos 40.000 años, Nueva Guinea y Australia. Estas islas, a pesar del descenso de las aguas provocado por las glaciaciones, estaban separadas por brazos de mar; por ejemplo, entre Indonesia y Australia quedaban aún casi 100 kilómetros de mar abierto que afrontar por lo cual es de suponer que estas poblaciones primitivas habían aprendido a navegar. Esta suposición se ve corroborada por el hecho de que en Australia se han encontrado huesos e instrumentos de más de 30.000 años. Es posible que estos hombres usaran balsas de bambú (muy abundante en aquella área) o troncos vaciados, como lo hacen en la actualidad algunos pueblos.

El segundo tronco de la migración procedente de África, hace unos 50.000-40.000 años, se dirigió hacia el norte y se dividió en otras dos ramas: una hacia Europa que desalojó al neandertal de ese continente y la otra hacia el noreste que, a su vez, se habría dividido en un grupo que se expandió hacia el norte, hacia Siberia, y la otra hacia el este, hacia Manchuria y Mongolia. Esta última migración debió llegar hasta Corea y Japón probablemente mediante embarcaciones primitivas (en Japón se han encontrado instrumentos de 30.000 años de antigüedad).



Migraciones del Homo sapiens

La última rama de estas migraciones es la que partiendo de Siberia llevó a los primeros hombres hacia América. Estos *sapiens sapiens*, aprovechando una situación climática favorable, consiguieron atravesar el estrecho de Behring gracias a una amplia faja de tierra emergida, “Beringia”. Hubo, al menos, dos oleadas: una hace unos 12.000 años o poco más, que fue la más numerosa e importante y colonizó América de norte a sur. Hubo después otra menor, hace unos 10.000 años, que se difundió a lo largo de las costas occidentales de Canadá y Alaska (todavía en la actualidad la lengua de este grupo es muy diferente a la de otros troncos pero muy semejante a la de los esquimales, un pueblo que emigró en la misma época).



Mural encontrado en la cueva de Laxcau en Francia

En resumen, partiendo de África, hace aproximadamente unos 60.000 años, aquellos *sapiens sapiens* tuvieron tal éxito en su expansión que ocuparon prácticamente todo el planeta en un lapso brevísimo (desde el punto de vista evolutivo) de 20.000 a 10.000 años. Y sustituyeron las antiguas poblaciones, allí donde existían, borrándolas genéticamente del mapa.

Esos mismos hombres, capaces ya de pescar y de navegar, fueron los primeros en dejarnos extraordinarios testimonios artísticos en las pinturas de murales como los de la cueva de Laxcau, en Francia.

Los primeros *sapiens sapiens* hallados en Europa y Asia se remontan tan solo 40.000-35.000 años. ¿Por qué no migraron antes? Las migraciones en la prehistoria no eran un acontecimiento automático, sino que debían estar probablemente influidas por una antigua ley natural: los hombres siguen a los animales, estos a los vegetales y los vegetales al clima. Tanto en Europa como en Asia las antiguas poblaciones de homínidos ceden poco a poco la escena a este nuevo protagonista que acaba por llenar todos los espacios.

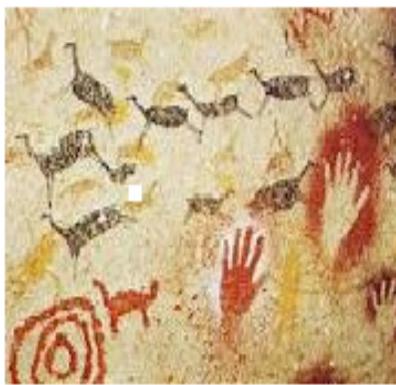
El número de humanos que sobrevivió a la edad madura se cuadruplicó hace 30.000 años (se define la edad madura como el doble de la edad a la cual se alcanza la madurez reproductiva que es también el tiempo en el cual aparecen los terceros molares, hacia el final de la adolescencia). Esa afirmación la hicieron los antropólogos en base al examen de más de 750 fósiles dentales de homínidos, a través de millones de años, desde los australopitecos, pasando por los neandertales, hasta los humanos modernos primitivos. Este aumento en la longevidad pudo haber sido crítico en el desarrollo de la cultura humana.

Se aparearon los neandertales y los *Homo sapiens*?

Una de las controversias más prolongadas y acaloradas acerca de la evolución humana gira en torno a la relación genética entre los neandertales y sus sucesores europeos. ¿Los seres humanos modernos que empezaron a desplazarse desde África hace unos 60 000 años sustituyeron por completo a los neandertales o se aparearon con ellos? En 1997 el genetista Svante Pääbo – adscrito en esa época a la Universidad de Munich- asestó un duro golpe a la segunda hipótesis, al estudiar un hueso del brazo de un neandertal original. Pääbo y sus colegas (entre los cuales se encuentra un colombiano, Hernán Burbano) lograron extraer un diminuto fragmento de 378 letras químicas de ADN mitocondrial del espécimen de 40 000 años de antigüedad. Cuando interpretaron el código, hallaron que el ADN del espécimen difería a tal grado de los seres humanos vivientes que sugería que los linajes de los neandertales y de los hombres modernos habían comenzado a divergir mucho antes de la emigración de los humanos modernos desde África, de suerte que los dos representan ramas geográficas y evolutivas distintas que se derivan de un ancestro común. “Al norte del Mediterráneo, este linaje se convirtió en el hombre de Neandertal –afirma Chris Stringer, director de investigación sobre los orígenes del hombre del Museo de Historia Natural de Londres- y al sur del Mediterráneo, en nosotros”.

La bomba genética de Pääbo pareció confirmar que los neandertales eran una especie distinta, pero no contribuyó a resolver el enigma de por qué los neandertales se extinguieron y nosotros, los *homo sapiens*, sobrevivimos. Una posibilidad lógica es que el hombre moderno era más inteligente y más sofisticado. Con base en el estudio de unos caninos de Neandertal encontrados en Le Moustier (Francia) los científicos consideran que los neandertales tenían infancias más cortas y, por consiguiente, menos tiempo para el desarrollo del cerebro.

El hombre de Cromagnon



Imágenes pintadas en las cuevas de Altamira (España)

Mientras el Neandertal apenas hablaba, el *sapiens* moderno – que recibió el nombre de hombre de Cromagnon en honor al sitio, en suelo francés, donde se hallaron sus restos óseos más significativos- articulaba perfectamente un vocabulario innovador, fruto de mutaciones repentinas en la laringe y la lengua. Muchos

investigadores piensan que esa fue la razón del dominio de los cromañones. Aquel *Homo sapiens sapiens* desarrolló una fascinante capacidad artística, reflejada en las cuevas de Altamira, en España. Su cerebro ya tenía el tamaño y la disposición del hombre moderno, frente a sus competidores de cráneo aún deforme.

Aquellas diferencias notables podrían explicar lo que la biología actual ha confirmado gracias al ADN: la ausencia total y absoluta de intercambio sexual entre el hombre de Cromagnon y los neandertales. ¿Cuáles fueron las causas? Se han propuesto dos hipótesis: la primera, que las féminas *sapiens sapiens* no se sintieran, en absoluto, atraídas por aquellos peludos y rudos habitantes de las cavernas, a quienes debieron observar como una especie inferior; la segunda, que tales intercambios fueran genéticamente imposibles ya que la mujer Neanderthal poseía una disposición pélvica que provocaba embarazos de doce meses, por lo cual los cruces fueron imposibles o produjeron híbridos infértiles.

Homo florensis

En 2004, un equipo de investigadores australianos e indonesios encontró, en la isla de Flores, en Indonesia, restos de humanos de apenas un metro de altura, que habitaron esa isla hace sólo 13.000 años.

Se suponía que *Homo sapiens* era el único humano que había habitado el planeta en los últimos 25.000 años, después de la desaparición de los neandertales en Europa y los *Homo erectus* en Asia. Los últimos homínidos de este tamaño fueron los australopécinos (como Lucy) que vivieron hace unos tres millones de años, mucho antes de que apareciera *H. sapiens*.

Homo erectus, el único homínido que vivía en el sureste de Asia, en esa época, debió cruzar las aguas profundas que separan Flores de Java lo cual lo catalogaría como un asombroso navegante a pesar de que no se conoce ningún material cultural que sugiera que era capaz de construir una embarcación. Los primeros botes se construyeron hace 40.000 a 60.000 años, cuando los humanos modernos colonizaron Australia de modo que la fauna de Flores probablemente llegó ahí nadando o flotando a la deriva sobre restos de árboles. Los humanos no son nadadores suficientemente fuertes para haber hecho el viaje de esa manera pero pudieron haber viajado a la deriva sobre balsas naturales.

Por otra parte, los biólogos han observado que los mamíferos más grandes tienden a encogerse en las islas pequeñas como respuesta adaptativa al escaso suministro de alimentos. Haciendo esto tienen poco que perder porque estos ambientes albergan pocos predadores. El descubrimiento de una especie homínido pequeña indicaría, entonces, que bajo las condiciones correctas, los humanos pueden responder en la misma forma que otros grandes mamíferos.

Los cerebros grandes son el distintivo de la evolución humana. En el transcurso de seis a siete millones de años, nuestros ancestros triplicaron la capacidad craneal al pasar de 360 centímetros cúbicos en *Sahelanthropus*, considerado el homínido más antiguo, hasta alcanzar los 1.350 centímetros cúbicos en los humanos modernos. La evidencia arqueológica indica que, de manera paralela, se incrementó la complejidad cultural; los expertos consideran que los cerebros grandes, en los humanos, eran un prerrequisito para las prácticas culturales avanzadas. Mientras los australopécinos solo fabricaron herramientas de piedra burdas, los *H. floresiensis* manufacturaron implementos que exhibían un nivel de sofisticación asociado exclusivamente con *H. sapiens*.

El descubrimiento, en la caverna, de restos de animales chamuscados sugiere que la cocina formó parte del repertorio cultural de *H. floresiensis*. Sorprende que un homínido limitado cerebralmente tuviera control del fuego. Se cree que los humanos no pudieron dominar el fuego hasta una época relativamente reciente; la evidencia inequívoca más temprana del uso del fuego se remonta a fogones de 200.000 años de antigüedad, hechos a mano por los neandertales.

Homo naledi



Restos de Homo Naledi encontrados en Sudáfrica

En septiembre de 2015, K. Wong anunció en *Scientific American* que en la región sudafricana de Cuna de la Humanidad, famosa por sus fósiles humanos, Lee Berger y otros investigadores de la Universidad Witwatersrand, en Johannesburgo, Sudáfrica, habían descubierto, bajo tierra, a 30 metros de profundidad, unos 1.550 especímenes de huesos y dientes que constituyen solo una fracción del material disponible en el sitio. Es el más grande tesoro de restos humanos fosilizados, jamás encontrado en toda África.

Los investigadores sugieren que los fósiles representan una nueva especie de nuestro género, *Homo*, con una peculiar mezcla de rasgos físicos, que desarrollaba comportamientos sorprendentemente sofisticados para el pequeño tamaño de su cerebro. Todavía no se ha determinado la edad de los fósiles. Estos exhiben una combinación de rasgos primitivos que evocan a nuestros antiguos predecesores australopitecos (incluyendo a Lucy y los de su tipo), y otros rasgos más asociados con el género *Homo*. Por ejemplo, la pelvis tiene una forma ensanchada vista en los *Australopithecus*, mientras que la pierna y el pie se parecen a los de un *Homo sapiens*. Igualmente, el cráneo a pesar de tener una pequeña caja cerebral muestra una constitución similar a la de un *Homo* antiguo. Los dientes, en cambio, son pequeños como los de los humanos modernos, aunque el tercer molar es más grande que los otros molares, un patrón asociado con los australopitecos. Y en las extremidades superiores, el hombro y los dedos se parecen a los de un *Australopithecus*, con palmas y muñecas como las de los *Homo*.

Con una altura de cerca de 1,5 metros, un cerebro pequeño, manos astutas y un cuerpo construido para caminar de manera erguida y también trepar, esta criatura posee un mosaico único de rasgos que Berger y sus coautores piensan, revela una nueva especie de humano. Dado los muchos rasgos de tipo *Homo* evidentes en los huesos —particularmente en esas regiones en contacto con el ambiente, como pies, manos y dientes—, el equipo ubicó a la criatura en el género *Homo* en lugar de *Australopithecus*, y lo bautizaron como *H. naledi*.

Pero el lugar exacto en el que *H. naledi* se ubica en el árbol genealógico humano, más allá de una de las ramas *Homo*, es incierto. La confusión surge en buena parte debido a que hasta ahora los investigadores no han podido determinar la edad de los huesos. Los huesos podrían tener muchos millones de años de antigüedad o tener una edad de decenas de miles años, aunque el equipo parece favorecer la idea de que *H. naledi* tiene sus raíces en un punto cercano al del origen de *Homo*. (El fósil más antiguo que se conoce de un *Homo* es una mandíbula inferior proveniente de Etiopía y que data de hace 2,8 millones de años).

Existe controversia sobre si este individuo de cerebro pequeño se hacía cargo de sus muertos: la ubicación de *H. naledi* en una cámara que parece haber sido siempre oscura y de difícil acceso sugiere que estos posibles humanos anduvieron grandes distancias para colocar los cuerpos ahí, y posiblemente necesitaron de una fuente de luz artificial (tal vez una simple antorcha) para hacerlo.

El alimento y la evolución de los primates

La dieta actual del hombre se diferencia mucho de la preferida por los antropoides desde su aparición, la cual se basa en las plantas. Probablemente muchos problemas de salud comunes en las naciones avanzadas proceden, al menos en parte, de una desconexión entre nuestra dieta y aquella a la que nuestro cuerpo se fue adaptando en un proceso de millones de años.

La historia comenzó hace unos 55 millones de años. Por aquella época, un mamífero diminuto e insectívoro, parecido a la musaraña trepó a los árboles en busca de su ración de insectos distribuidores de polen. Sus descendientes se acostumbraron a vivir en los árboles y a alimentarse de lo que estos producían. Este escenario preparó la aparición del orden Primates.

A medida que iba ganando importancia la dieta vegetal, en un proceso evolutivo de millones de años, se iban configurando los rasgos que definen a los primates. La mayoría de las características facilitan el movimiento por los árboles y la recolección de alimento allí como, por ejemplo, las manos prensiles que cortan ramitas.

Muchos alimentos vegetales carecen de uno o varios de los nutrientes que necesitan los animales, como pueden ser ciertas vitaminas o aminoácidos o son pobres en carbohidratos de fácil digestión (almidón y azúcar) que proporcionan glucosa y, por ende, energía. Por eso, los animales que dependen de las plantas para cubrir sus requerimientos nutritivos diarios, deben buscar fuentes complementarias de nutrientes, lo cual complica bastante la recolección de alimento.

En el hombre, lo mismo que en la mayoría de los demás primates, la fibra vegetal pasa sin apenas cambios a través del estómago ácido y del intestino delgado (donde se absorben la mayoría de los nutrientes) hacia el tubo digestivo posterior (el ciego y el colon).

Las especies pueden optar por alimentarse solo de los alimentos vegetales de mayor calidad. Ante la escasez de éstos y la distribución heterogénea en la selva, una buena memoria ayudaría a recordar el lugar exacto donde están los árboles que producen frutos deseables y las rutas más cortas para llegar a ellos. Además, cuándo se podía disponer de mejores frutos. Esos beneficios podrían haber instado a la selección hacia un cerebro mayor, con más superficie para el almacenamiento de la información. Pero el cerebro es un órgano costoso de mantener; se lleva una cantidad desproporcionada de la energía (glucosa) que se extrae del alimento. La selección natural no habría apostado por un cerebro grande, a menos que con ello se obtuviera un beneficio claro.

El cerebro humano creció durante más de dos millones de años (hasta hace unos 250.000 años), al ritmo de un volumen equivalente a una cucharada cada 100.000 años. Por lo que parece, cada cucharada de materia cerebral añadida al género *Homo* produjo efectos benéficos que intensificaron su tendencia hacia el progreso técnico y social.

El tubo digestivo humano es más bien pequeño para un animal de su talla. Sin embargo, su aparato digestivo procesa la fibra con un rendimiento muy similar al del chimpancé. Además, conforme aumenta la proporción de fibra en la dieta, chimpancé y hombre aumentan la velocidad a la que el alimento transita por el tubo digestivo. Esta respuesta permite procesar una mayor cantidad de alimento por unidad de tiempo con lo cual el animal compensa la disminución en la calidad del alimento, con una mayor cantidad de comida diaria.

Si es verdad que el tracto digestivo humano se halla adaptado a una dieta rica en materia vegetal y fibra, cobra fuerza la idea de que las sociedades industrializadas comen demasiado carbohidrato refinado y poca fibra. La aparición del hombre moderno se produjo, en buena medida, porque la selección natural favoreció adaptaciones que permitieron que los primates centraran su alimentación en las dietas más ricas en energía y más pobres en fibra. Sin embargo, es posible que, en la actualidad, la humanidad se esté resintiendo de una dieta muy pobre en fibra.

La selección sexual

Además del aumento más o menos constante del tamaño del cerebro, se produjo otro cambio notable: la selección sexual.

Las hembras crecieron en relación a los machos. Mientras que en los chimpancés y en los primeros fósiles de hombre-mono el tamaño de los machos era una vez y media el tamaño de las hembras; en la actualidad, la proporción de hombre a mujer es bastante menor lo cual significa que el sistema de apareamiento de la especie cambió. La promiscuidad del chimpancé con sus cortas relaciones amorosas y la poligamia, tipo harén, del gorila, fueron sustituidas por un sistema más monógamo, en donde cada sexo debe elegir cuidadosamente a su pareja; en la poligamia sólo la hembra es exigente a la hora de elegir. Los largos emparejamientos encadenaron a los hombres-mono con su compañera, durante una buena parte de su vida reproductiva; para los machos fue vital elegir compañeras jóvenes porque tenían por delante una vida reproductiva más larga.

La división sexual del trabajo en cuestión de alimentación empujó a los humanos hacia la monogamia definitiva. A diferencia de cualquier otra especie del planeta, inventamos una asociación única entre los sexos. Las mujeres recogieron los alimentos vegetales y los hombres salieron en busca de carne. Al compartir la carne cazada por los hombres, las mujeres ganaron el acceso al alimento fácil de digerir, sin tener que abandonar a sus hijos para buscarlo.

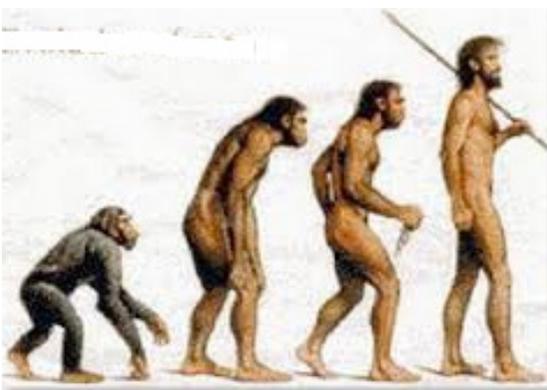
La costumbre adquirida mediante la división sexual del trabajo se extendió a otros aspectos de la vida. Desarrollamos una actitud compulsiva para compartir cosas lo cual permitió que cada individuo se especializara. Esta división del trabajo entre especialistas, característica única de nuestra especie, fue la clave de nuestro éxito ecológico porque permitió el desarrollo de la tecnología.

Eva

En enero de 1987, un equipo de científicos de la Universidad de Berkeley publicó un artículo en la revista *Nature* en el cual afirmaba que todos los seres humanos derivan de una sola mujer que habitó en el África subsahariana oriental hace 200.000 años. Este equipo trabajó con el ADN mitocondrial de 147 personas de todo el mundo. El análisis de este tipo de ADN, que se hereda de mujer a mujer, conduce a una mujer *Homo sapiens* surgida de una familia de no más de 10.000 miembros que se desarrolló a partir del *Homo erectus* sin salir de África. Aquella mujer recibió el nombre de Eva mitocondrial. Estos estudios descartaron la influencia sobre el ser humano actual de cualquiera de las otras especies que entonces habitaban la Tierra.

A Eva le faltaba su Adán cromosómico. En mayo de 1995, un grupo de investigadores de las universidades de Yale, Harvard y Chicago, entre los que se encontraba W. Gilbert, un premio Nobel norteamericano, publicó un artículo en la revista *Science*, según el cual “una secuencia genética idéntica en todos los varones permite rastrear el linaje evolutivo de los hombres hasta el primer *Homo sapiens*”, que debió vivir en África hace unos 270.000 años. Después de unos ajustes estadísticos, los científicos llegaron a la conclusión que nuestros primeros padres vivieron en África hace unos 150.000 años.

El poblamiento de América



En base a estudios genéticos sobre la tasa de mutación del ADN mitocondrial, se considera que el poblamiento de América pudo haber ocurrido hace entre 55.000 y 11.000 años. Partió de Asia, aprovechando la disponibilidad del corredor de tierra entre Siberia y Alaska (estrecho de Behring) y avanzó de norte a sur, poblando paulatinamente todo el continente americano.

Las predicciones son difíciles de hacer, especialmente las del futuro

NIELS BOHR (premio Nobel de Física)

12. El Futuro

Hacer predicciones siempre ha sido difícil. Pero lo es aún más cuando solo se dispone de un modelo de todo: un universo, un solo planeta habitado, una sola forma de vida, etcétera.

Lo que se percibe hasta aquí es que el Universo y todo cuanto en él existe se ha mantenido en un cambio constante por lo que se presume que esta situación continúe hacia el futuro.

Parece que a muy largo plazo, miles de millones de años adelante, la especie humana y la vida, en general, están destinadas a desaparecer. De todas formas, el futuro del Universo será catastrófico: o bien el Universo seguirá expandiéndose indefinidamente debido a la energía oscura –que es la última conclusión a la que han llegado los científicos- y enfriándose cada vez más hasta extremos por completo incompatibles con la vida o, en algún momento –la posibilidad menos posible, de acuerdo al conocimiento actual- el Universo dejará de expandirse y comenzará el proceso contrario: la contracción de toda la materia hasta el colapso final para llegar de nuevo a la situación inicial que dio comienzo al Universo: una materia de densidad infinita que posiblemente origine otro Big Bang para repetir el proceso en un ciclo sin fin. Sin embargo, el tiempo para que esto ocurra es tan extremadamente grande, comparado con el de la efímera existencia de la especie humana que es muy posible que, mientras tanto, la vida haya desaparecido por otras causas. Una de ellas puede ser un conflicto de grandes proporciones originado por los mismos humanos. Es de esperar que la raza humana evolucione en el sentido de que el raciocinio y la tolerancia primen sobre la emocionalidad y el dogmatismo.

Otra causa para que la vida se extinga en nuestro planeta puede ser la desaparición natural y espontánea de la estrella que nos alumbra. Se calcula que dentro de cinco mil millones de años el Sol habrá duplicado su diámetro; en ese momento, su luminosidad habrá crecido en proporción parecida con el consiguiente calentamiento exagerado del planeta. Pero lo peor vendrá después: en tres mil millones de años más, el tamaño del Sol se habrá multiplicado por cien y su luminosidad por dos mil. Como consecuencia, los océanos se evaporarán, los metales

se derretirán y la Tierra se convertirá en un desierto hirviente, sin ningún rastro de vida. En esa época, en cualquier momento, el disco solar ocupará la mitad del firmamento, un espectáculo impresionante y pavoroso pero no habrá quien lo presencie.

Un poco más tarde, el Sol se convertirá en una gigante roja que engullirá, durante su fase de inflación, los cuatro planetas más cercanos incluida la Tierra. Muchísimo después, el dios Sol terminará su historia gloriosa convertido en una insignificante enana blanca. Será también el fin energético de todo el sistema solar. Es posible que la vida inteligente de esta región de la galaxia, para ese entonces, cuente con muchos milenios de haberse extinguido. De quedar descendientes, serán aquellos terrícolas que lograron trastearse a otros sistemas de la Vía Láctea, más jóvenes y amigables, empresa que, por lo pronto, parece imposible.

El mañana próximo

Miles de millones de años es un período demasiado extenso para los tiempos que acostumbramos a manejar en nuestra vida cotidiana. De modo que tenemos que reducir nuestras miras en lo que al tiempo se refiere.

El hombre de Neanderthal se extinguió definitivamente hace 30.000 años. El hombre de Cromagnon, el *Homo sapiens* venció. El resultado somos nosotros. Si le hacemos caso a los dibujantes de tiras cómicas, nuestros herederos, dentro de medio millón de años, serán más débiles y pequeños, con cráneos voluminosos y ojos desorbitados. Pero es difícil hacer conjeturas sobre el desarrollo posterior del hombre. Los científicos sociales coinciden en que el desarrollo será más cultural que biológico y en que los genetistas podrán controlar y dirigir la evolución biológica por lo cual, cualquier predicción al respecto queda sin base. En este momento ya se conoce el genoma humano y se dispone de técnicas para modificar la herencia que, con el desarrollo de nuevas técnicas biológicas, se afinarán cada vez más. La cuestión es si estamos preparados para modificar nuestro destino evolutivo. Lo más probable es que sigamos avanzando pero sin tener claro hacia dónde nos queremos dirigir.

Según C. Haub, un demógrafo de Population Referente Bureau, en Washington, entre 50.000 a.C. y 2002 d.C. nacieron cerca de 106.000 millones de personas (habría que agregar un millón de personas más, desde ese momento hasta ahora). ¿Será posible que esa población se estabilice o estaremos abocados a que el número de personas siga creciendo hasta que llegue un momento en que los alimentos que se producen sean insuficientes para alimentar toda la población? ¿tendremos que pelear metro a metro por las pocas fuentes de agua disponibles?

Hay que recordar que esta visión que puede parecer catastrófica ya se está dando en algunos países africanos y en el Sureste asiático. En la actualidad existen diversas técnicas de fácil aplicación para controlar la reproducción que muchas veces chocan contra la ignorancia –la cual parece disminuir con el mayor grado de desarrollo económico-, la cultura o el dogmatismo religioso.

Mientras no se controle el problema de la natalidad no tiene sentido pensar en la situación contraria, la de prolongarla vida la cual queda reservada, por ahora, para unos cuantos privilegiados. No valdría la pena vivir muchos años, con un nivel de vida deplorable. En ese caso sería preferible vivir la vida con mayor disfrute e intensidad, aunque sean menos años.

Desde el punto de vista científico, ¿habrá alguna posibilidad de que, en un futuro próximo, haya personas que no mueran? Una posibilidad podría ser mediante reprogramación genética de las células normales que impida a los **telómeros**, que se encuentran al final de los cromosomas, controlar la reproducción indefinida, como sucede en las células cancerosas. Sin embargo, los sistemas biológicos son tan complejos que el controlar un componente no garantiza que se puedan controlar todos los que tienen relación con la edad.

El congelamiento podría ser otra posibilidad pero esta es una técnica que todavía está en pañales. Por el momento, no se puede asegurar que en el momento de la reanimación lo que aparezca sea una masa informe de células. Pero aún, si algún día se pudiera, valdría la pena despertarse completamente desadaptado, en un mundo ajeno y, prácticamente, convertirse en una pieza de museo viviente?.

La prolongación de la vida podría lograrse mediante el reemplazamiento de órganos que es algo que ya se hace. Podría pensarse en un futuro en cambiar células y aún moléculas utilizando materiales sintéticos más durables como la silicona. Sin embargo, por razones éticas, no va a ser posible reemplazar el cerebro lo cual, necesariamente, impide prolongar la vida.

Combustibles

En la actualidad, parece haber una relación directa entre el desarrollo de una nación y el consumo de combustibles: entre más desarrollada es una nación mayor es su gasto de combustibles. La fuente de energía que alimentó la economía del siglo XX se basó en el petróleo y, muy posiblemente, la misma tónica se mantenga durante el siglo XXI hasta tanto las reservas de este combustible fósil se agoten. Para algunos geólogos, el mundo se dirige hacia una crisis petro-

lera de proporciones históricas. La crisis vendrá no cuando los pozos comiencen a secarse sino cuando la producción mundial de petróleo alcance un pico y comience a declinar. En ese momento, los precios se incrementarán de manera rápida a menos que la demanda, la cual ha ido aumentando año tras año, comience a disminuir. Sin embargo, hay desacuerdo sobre cuándo se presentará el pico de producción. El Departamento de Energía de Estados Unidos tiene varias proyecciones que van desde el 2021 hasta el 2112. Otros estiman que ese pico ya comenzó en 2005. Si esta última proyección es cierta, el tiempo para una transición ordenada a otras fuentes de energía será insuficiente. El *Geological Survey* de Estados Unidos estima que antes de que comenzara la extracción de petróleo en el siglo XIX, bajo el suelo se encontraban un total de 3.300 billones de barriles de los cuales solo se han extraído 700 billones lo cual implicaría que el pico de producción de petróleo todavía se demoraría bastantes años más. Sin embargo, con el consumo cada vez mayor de combustible por parte de economías emergentes, como China e India, con un número muy grande de personas –la tercera parte de la población mundial– las reservas quizás se agoten bastante antes de lo calculado. Esto no será un problema serio si otra forma de energía sustituye al petróleo con precios comparables y sin crear problemas ambientales serios.

Los principales consumidores de petróleo son los millones de vehículos de todo tipo que se desplazan sobre la Tierra. Los motores de los automóviles son cada vez más eficientes: cada vez consumen menos gasolina por kilómetro recorrido pero, también, cada vez es mayor el número de vehículos en movimiento. El reemplazo de los motores convencionales por motores eléctricos alimentados por baterías recargables o por motores alimentados con hidrógeno o gas natural todavía se encuentra en sus comienzos.

Muchos analistas consideran que el gas natural será el combustible del siglo XXI. De hecho, las reservas de gas ya representan un 87 por ciento de las reservas de petróleo, en términos del contenido energético. Si esto sucede, las consecuencias geopolíticas serán un desplazamiento del poder económico de los miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) hacia Rusia, el país con mayores reservas de gas natural del mundo. Pero antes de que esta transición se dé, debe contarse con una infraestructura para el gas, similar a la que existe en la actualidad para el petróleo. El gas natural es abundante pero se encuentra en lugares de difícil acceso y el sistema para su transporte está poco desarrollado. A diferencia del petróleo, no se puede almacenar por lo cual se debe transportar de inmediato ya sea por oleoducto o en barco, a través del océano. Para su transporte marítimo se debe licuar a 1/600 de su volumen original. El combustible se carga en barcos especialmente diseñados para tal fin. En el puerto de destino se regasifica y, por último, se lleva a su destino mediante el oleoducto. Pero todo este proceso es costoso.

Es claro, entonces, que hay que detener el ritmo de desarrollo, algo a lo que no parece estar dispuesto ningún país, o buscar sustitutos a las fuentes actuales de energía. Hay varias posibilidades: carbón, etanol, hidrógeno, energía eléctrica, energía lumínica, eólica, geotérmica, etcétera. De todas ellas la de mejores perspectivas es el hidrógeno porque rinde una gran cantidad de energía, es un combustible muy limpio, desde el punto de vista ecológico, ya que al quemarse sólo produce vapor de agua y calor. Sin embargo, a pesar de que es el elemento más abundante en el universo, es muy escaso en la Tierra, en su forma molecular (H_2) que es la aprovechable. Por ahora, no hay una metodología para su producción, a gran escala.

Por su parte, el carbón es un combustible barato y las reservas mundiales de este mineral son suficientes para abastecer a la humanidad durante bastantes años más. Sin embargo, el carbón presenta problemas graves de contaminación tanto en su extracción y transporte como en su procesamiento. Además al quemarse libera a la atmósfera grandes cantidades de dióxido de carbono, un gas de invernadero que contribuye al calentamiento global.

El etanol, obtenido a partir de plantas, no parece suficiente para sustituir por completo a la gasolina y se debería utilizar más bien como complemento de ésta.

Las plantas aprovechan, con bastante eficiencia, la energía lumínica, procedente del Sol, para realizar la fotosíntesis. El hombre, en cambio, solo la aprovecha en una proporción mínima y el desarrollo tecnológico todavía es bastante incipiente para mejorar de manera sustancial ese rendimiento.

El aprovechamiento de las energías eólica, geotérmica o la proveniente de las olas del mar está limitada a que, en las cercanías se disponga de vientos fuertes, volcanes o costas.

Vida artificial

En la actualidad (2015), los científicos están diseñando modelos de computador para entender la función de cada gen y cada molécula dentro de una célula, con lo cual se pueden entender y diseñar sistemas biológicos. En 2013 se completó la simulación de una bacteria común infecciosa-*Mycoplasma genitalium*- que tiene 525 genes (en contraste, las células humanas, tienen más de 20.000 genes). Los científicos sintetizaron artificialmente los genes y los introdujeron en una célula de *Mycoplasma*; la célula funcionó normalmente. Este trabajo, todavía imperfecto está generando nuevos descubrimientos. Ahora, el interés es construir modelos de organismos más complejos con la visión, a largo plazo, de simular, en detalle, células y órganos humanos. El problema, ahora, es más de definición: ¿en qué momento se construye vida?.

Máquinas

Desde que el hombre ideó las primeras herramientas de piedra, su número, diversidad y aplicación han aumentado de manera asombrosa. La tendencia es a que estas herramientas sean cada vez más completas, autónomas, seguras y pequeñas. Cada vez la automatización y la miniaturización serán mayores. Los robots reemplazarán al hombre en trabajos repetitivos, en misiones peligrosas (como desactivar explosivos) o en tareas que demanden gran tiempo (como viajes a otros planetas). Incluso se fabricarán nanorrobots (nano se refiere a muy pequeño) que penetren al interior del organismo humano y ayuden a encontrar el origen de una enfermedad o contribuyan a su curación. Los nanorrobots posiblemente combinen dispositivos electrónicos en miniatura con biomoléculas tales como el ADN y las proteínas. Aquí el problema es si estas nanomáquinas estarán al alcance de todos los humanos o solo podrán ser utilizadas por unos pocos privilegiados (posiblemente los que dispongan de mayores recursos económicos).

Calentamiento global

El impacto futuro del calentamiento global se notará principalmente en el Ártico porque allí, en las últimas décadas, la temperatura se ha elevado casi el doble que en el resto del mundo. Aunque la mayor parte de la energía solar llega a la zona tropical, la atmósfera y los océanos redistribuyen la energía ecuatorial hacia los polos. A diferencia del trópico, donde una gran proporción de la energía que alcanza la superficie se consume en la evaporación, la mayor parte de la energía recibida en la superficie del Ártico se gasta en el calentamiento de la atmósfera.

La capa de hielo de Groenlandia, la más grande sobre la Tierra, probablemente comenzará a fundirse este siglo, de manera irreversible con lo cual se elevarán los niveles del océano en ocho metros amenazando muchas ciudades costeras.

Además, al retirarse el hielo, el carbón almacenado en el Ártico, un 14 por ciento del total mundial, reforzará el efecto invernadero. También un 25 por ciento de las reservas de petróleo y gas se encuentran en el Ártico.

Bibliografía

- ANDERSEN R.D., An ear to the Big Bang, *Sci. Am.*, Oct. 2013, 27-35
- BARCELO C., LIBERATI S., SONEGO S., VISSER M., Black stars, not holes, *Sci.Am.*, Oct. 2009, 20-27
- BARGER A.J., The midlife crisis of the cosmos, *Sci.Am.*, Jan. 2005, 32-39
- BIELLO D., HARMON K., Tools for life, *Sci. Am.*, Aug 2010, 11-12
- BILLINGS L., The search for life on faraway moons, *Sci.Am.*, Jan. 2014, 28-33
- BLITZ L., The dark side of the Milky Way, *Sci.Am.*, Oct 2011, 22-29
- BOOTH B., FITCH F., La inestable Tierra, Barcelona: Salvat, 1986
- BORRELL B., Gravity's tug, *Sci.Am.*, Aug 2010, 38
- BOSLOUGH J., El universo de Stephen Hawking, Barcelona: Salvat, 1986
- BRADLEY A.S., Expanding the limits of life, *Sci.Am.*, Dec. 2009, 38-43
- BRODERICK A.E., LOEB A., Portrait of a Black hole, *Sci.Am.*, Dec 2009, 20-27
- BRONOWSKI J., Creative Process, *Sci.Am.*, Sep 2008, 7
- CARR B.J., GIDDINGS S.B., Quantum black holes, May 2005, 30-35
- CATLING D.C., ZAHNLE K., The planetary air leak, *Sci. Am.*, May 2009, 24-31
- CHOI C., Permian puzzle, *Sci.Am.*, May 2009, 8
- CHOI C., Through Titan's haze, *Sci. Am.*, Jan 2005, 13-14
- CLIFTON T., FERREIRA P.G., Does dark energy really exist?, *Sci.Am.*, Apr 2009, 32-39
- CONSELICE C.J., The Universe's invisible hand, *Sci.Am.*, Feb 2007, 24-31
- COVERT M.W., Simulating a living cell, *Sci. Am.*, Jan. 2014, 34-41
- DAGUER C., La evolución pasó por aquí, *El Tiempo*, Feb. 15, 2009, 2
- DANIELSON D., GRANEY C., The case against Copernicus, *Sci. Am.*, Jan. 2014, 62-67
- DARWIN C., Autobiografía, Madrid: Alianza editorial, 1993
- DARWIN C., El origen de las especies, Barcelona: Bruguera, 1967
- DARWIN C., El origen del hombre, Medellín: Anteo
- DAVIES P., La frontera del infinito, Barcelona: Salvat, 1986
- DAWKINS R., Evolución, Bogotá: Planeta, 2009
- DE DUVE C., Polvo vital, Bogotá: Norma, 1999
- _____ Dios habla hoy, LA BIBLIA, 2ª ed., Sociedades Bíblicas Unidas, Canadá, 1983
- _____ El colombiano detrás del genoma neandertal, Matices, Universidad Nacional de Colombia, 25.

- _____ El Tiempo, Cada vez más cerca del origen del universo, , Mar 23, 2014, 5
- FENG J., TRODDEN M., Dark worlds, *Sci.Am.*, Nov 2010, 20-27
- FOLGER T., La verdadera gran explosión, Discover en español, Ene 2003, 22-29
- GAL-YAM A., Super Supernovae, *Sci.Am.*, Jun 2012, 28-33
- GEACH J.E., The lost galaxies, *Sci. Am.*, May 2011, 30-37
- GOLDSMITH D., The planetary tease, *Sci.Am.*, Jun 2009, 33
- GRIBBIN J., La Tierra en movimiento, Barcelona: Salvat, 1986
- HALL S.S., Los últimos Neandertales, National Geographic en Español, Oct 2008, 1-25
- HAWKING S., La historia del tiempo, Bogotá: Grijalbo, 1989
- HAWKING S., El gran diseño, Bogotá: Planeta, 2010
- HOAGLAND M., Las raíces de la vida, Barcelona: Salvat, 1985, 3
- IBATA R., GIBSON B., The ghost of galaxies past, *Sci. Am.*, Apr. 2008, 24-29
- JACOB F., La lógica de lo viviente, Barcelona: Salvat, 1986
- JENKINS A., PEREZ G., Life in the multiverse, *Sci.Am.*, Jan 2010, 28-35
- JOU D., Reescribiendo el Génesis, Bogotá: Planeta, 2008
- KIPPENHAHN R., Cien mil millones de soles, Barcelona: Salvat, 1986
- KOSTLER A., Los sonámbulos (I), Barcelona: Salvat, 1986, 87
- LAURSEN L., The Real Bigfoot, *Sci.Am.*, Jan 2014, 10
- LAYZER D., Construcción del Universo, Barcelona: Prensa Científica, 1989
- LEMONICK M., The dawn of distant skies, *Sci.Am.*, Jul 2013, 28-35
- LEMONICK M.D., The first starlight, *Sci. Am.*, Apr 2014, 24-31
- LIBESKIND N.I., Dwarf Galaxies and the Dwarf Web, *Sci.Am.*, Mar 2014, 30-35
- LINEWEAVER C.H., DAVIS T.M., Misconception about the Big Bang, *Sci.Am.*, Mar 2005, 24-33
- LUQUE E., Bioquímica, 2ª ed., Pasto: Universidad de Nariño, 2010
- LUQUE E., Del Universo al hombre, Universidad de Nariño, Pasto, 2005
- MATSON J., Damp rocks from space, *Sci.Am.*, Jul 2010, 11
- MATSON J., More mysterious Methane, *Sci.Am.*, Mar 2009, 15
- MCKEE T., MCKEE J.R., Bioquímica, 3ª ed., Interamericana, 2006
- MOYER M., Religious thought, *Sci.Am.*, Sep 2009, 76
- MURCHIE S.L., VERVACK R.J., ANDERSON B.J., Journey to the Innermost planet, *Sci.Am.*, Mar 2011,
- MUSSER G., Spectral Sensation, *Sci.Am.*, May 2009, 14-15
- O'BRIEN S.J., JOHNSON W.E., The evolution of cats, *Sci. Am.*, Jul 2007, 50-57
- PELT J.M., Las plantas, Barcelona: Salvat, 1986
- PORCO C., The restless world of Enceladus, *Sci. Am.*, Dec 2008, 26-35
- PRINGLE H., Long live to the humans, *Sci. Am.* Oct. 2013, 35-41
- PUENTE O.G., La religión ivaya timo!, Madrid: Laetoli, 2009
- RENNIE J., Inspirational Orbits, *Sci.Am.*, Jun 2009, 4
- RICARDO A., SZOSTAK J., Life on earth, *Sci.Am.*, Sep 2009, 38-45
- RIORDAN M., ZAJC W., The first few microseconds, *Sci. Am.*, May 2006, 24-31

- SAGAN C., El mundo y sus demonios, Bogotá: Planeta, 1997
- SANCHEZ T.F.M ¿Cuándo se inicia la vida?, El Tiempo, Julio 6, 2014, 8
- _____ SEMANA, Una mente gigante, Febrero 2, 2009, 72-73
- _____ SEMANA, La Evolución de una teoría, Feb 2, 2009, 74
- _____ SEMANA, Dios vs. El mono, Feb 2, 2009, 75
- _____ SEMANA, 1578, Los expertos de la telefonía móvil, Agosto 2012, 64-65
- _____ SEMANA, 1677, Los ojos del mundo, Junio 2014, 70
- SOTER S., What is a planet?, *Sci. Am.*, Jan. 2007, 20-27
- TODHUNTER A., Secretos profundos y oscuros, *National Geographic*, Ago 2010, 2-20
- TURNER M.S., Origin of the Universe, *Sci.Am.*, Sep 2009, 22-29
- WERNER M.W., JURA M.A., Improbable planets, *Sci.Am.*, Jun 2009, 26-32
- WONG K., The mammals that conquered the seas, *Sci. Am.*, 286(5): 52-61, 2002
- WONG K., Homo naledi, *Sci. Am. en español*, Sep 2015.
- ZIMMER C., The oldest rocks on Earth, *Sci.Am.*, Jan 2014, 42-47,