

Vida en la Tierra

Alberto C Riccardi

Universidad Nacional de La Plata, CONICET

La biosfera es la envoltura viviente del planeta Tierra y constituye su característica más notable pues es única dentro del Sistema Solar. Es el producto de millones de años de evolución, cuyo registro se evidencia en las rocas y en los restos –fósiles– de los diferentes tipos de organismos que caracterizaron sucesivos momentos de la historia de la Tierra.

El estudio de tales evidencias resulta de importancia para comprender los procesos abióticos y bióticos (inorgánicos y orgánicos) que han ocurrido en el planeta desde su origen, la relación que hubo entre ellos y su incidencia en la evolución de la vida y de la Tierra. Este conocimiento es fundamental para tratar de predecir, prevenir o modificar circunstancias vinculadas al futuro de la vida terrestre. Con tal propósito, es importante tener en cuenta que aunque las evidencias más visibles y que usualmente son consideradas corresponden a los organismos más complejos y están restringidas a los últimos 600 Ma (1 Ma = 1 millón de años), la vida tiene un registro mucho mayor, que se remonta aproximadamente a los 3500 Ma (figura 1).

El sistema Tierra está actualmente controlado por procesos físico-químicos y biológicos, razón por la cual se ha reconocido que *la Tierra se comporta como un sistema único y autorregulado, formado por componentes físicos, químicos, biológicos y humanos* (Declaración sobre el Cambio Global, Amsterdam, 2001). Este control paralelo comenzó con el origen de moléculas orgánicas complejas casi 4000 Ma antes, y se incrementó hace 2700 Ma, cuando la vida pasó a tener un efecto significativo en la atmósfera, los océanos y la litosfera (corteza terrestre).

Contexto cósmico

Si se consideran las condiciones necesarias para la existencia y evolución de la vida sobre la tierra, tal como la conocemos, no solo resulta evidente que hay varias que son indispensables, sino que deben también encontrarse en un equilibrio adecuado. Los requisitos necesarios son: abundancia de ciertos elementos químicos en los que se basa la vida (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno –CHON–, fósforo, azufre –P, S–), ausencia de compuestos nocivos (como metano, amoníaco), un determinado rango de temperaturas, fuente de energía –como la solar– que sea relativamente uniforme y no esté sujeta a grandes fluctuaciones, campo gravitatorio que evite la fuga de la atmósfera y al mismo tiempo permita una movilidad apropiada, protección contra rayos ultravioletas y cósmicos (tal como la provista, respectivamente, por la capa de ozono y por el campo magnético terrestre).

La existencia de una complejidad apropiada en tejidos y órganos especializados limita los elementos químicos en los que se puede basar la vida. De los elementos fundamentales para la vida (CHON, P, S), que se encuentran entre los más comunes en el universo, el C es el más importante debido a su capacidad de formar moléculas gigantes de gran variedad y complejidad (polímeros), como aminoácidos, proteínas, ADN (ácido desoxirribonucleico).

En el momento en que se produjo el Big Bang y se originó el universo, el C no existía. El material cósmico, formado por partículas elementales (protones y neutrones), pasó a constituir átomos de H y a medida que el universo

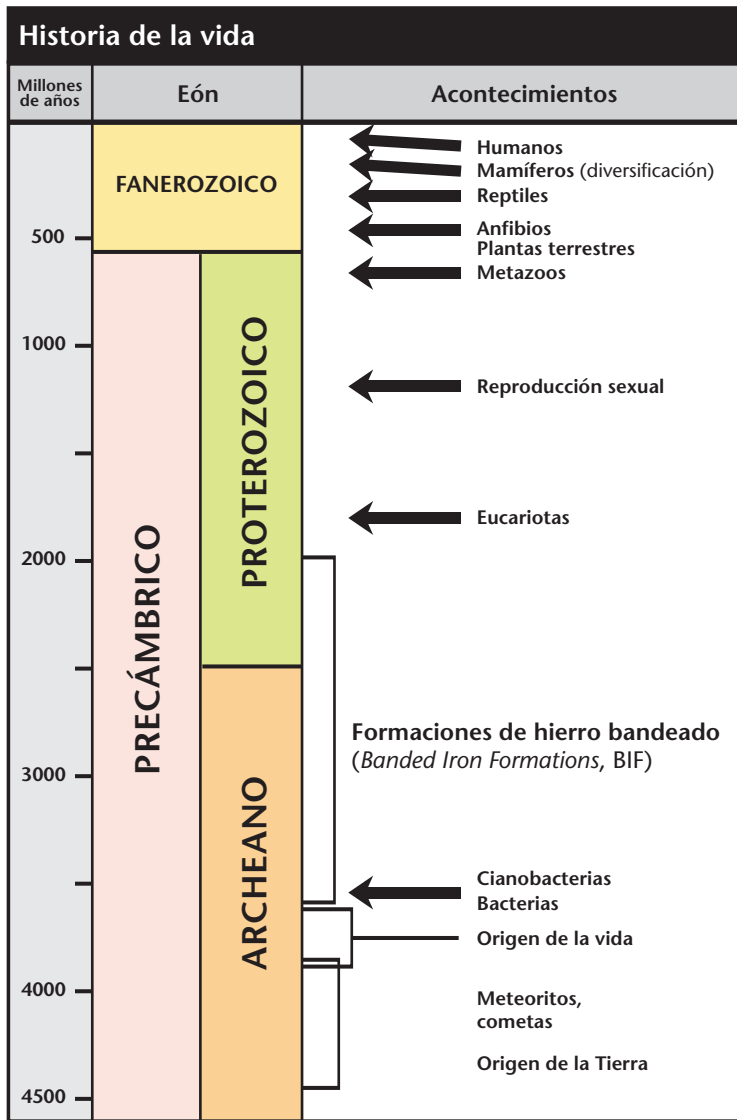


Figura 1. Principales acontecimientos de la historia de la vida, con registro algunas evidencias de más de 2000 Ma indicando condiciones ambientales especiales. Nótese la extensión del tiempo (Eón) Precámbrico con relación al Fanerozoico.

agua, y sin oxígeno libre –ni ozono–, era reductora y transparente a las radiaciones ultravioletas que, consecuentemente, llegaban a la superficie. Además, tanto la Tierra como los demás planetas estaban sujetos a frecuentes impactos de asteroides y cometas.

En esas condiciones es difícil estimar qué posibilidades había para que la vida se originase. Existen diferentes posturas respecto de este punto. Hay quienes consideran que pudo haber sido un accidente químico de enorme improbabilidad que nunca se repetirá en todo el universo. Otros, en cambio, postulan que, dadas las condiciones apropiadas, su aparición puede ser un fenómeno común y automático. Como la vida, tal como la conocemos, requiere cientos de miles de proteínas especializadas y ácidos nucleicos, un origen debido exclusivamente al azar sería altamente improbable. Desde una posición determinista se ha estimado que la vida, en principio, se podría formar automáticamente en cualquier ambiente aproximadamente similar al de la Tierra. Sería el resultado de leyes universales, las cuales así como la produjeron en la Tierra también podrían originarla en otros planetas con condiciones adecuadas, por más rara que sea la existencia de estos. En definitiva parecería ser que aunque las propiedades del universo son poco propicias para la vida, habrían resultado esenciales para su existencia.

Este dilema sería fácilmente resuelto si se comprobase la existencia de vida en otro planeta

se expandió y enfrió las reacciones nucleares de las primeras grandes estrellas fueron transformado el H en helio, C y en otros elementos. Los más pesados fueron expulsados por el viento solar o liberados, al explotar algunas de estas estrellas, luego de cumplir su ciclo (supernovas), y se mezclaron con nubes de gas, principalmente hidrógeno, que se encontraban en el espacio interestelar. Las nubes suficientemente masivas se contrajeron y dieron lugar a nuevas estrellas, alrededor de las cuales se formaron nebulosas en las que los materiales se desplazaron de acuerdo con su densidad y se condensaron, formando planetas como los del Sistema Solar. La antigüedad de éste y de la Tierra (4540 Ma) se ha determinado en meteoritos sobre la base de las abundancias relativas de diferentes isótopos radiactivos y de sus productos derivados.

La atmósfera y la hidrosfera terrestres probablemente comenzaron formarse tan pronto como la corteza se enfrió por debajo del punto de fusión, hecho ocurrido entre 4540 y 3760 Ma. La atmósfera, compuesta por hidrógeno, helio y pequeñas proporciones de metano, amoníaco y vapor de

De la formación de la Tierra a las primeras evidencias de vida

Hace unos 4500 Ma la Tierra difería sustancialmente del planeta actual. La superficie era caliente y el bombardeo de meteoritos e impactos con asteroides y cometas eran casi continuos, los océanos probablemente eran menos profundos y la atmósfera, aplastante. Había una mayor cantidad de elementos radiactivos y de reacciones nucleares, el vulcanismo estaba muy extendido, la Luna más cerca, las mareas eran enormes, el planeta rotaba más rápido y el día y la noche eran más cortos, las masas continentales eran más pequeñas y probablemente se desplazaban más rápidamente debido al alto flujo calórico proveniente del interior.

Especialmente importantes entre los 4540 y los 3800 Ma habrían sido los impactos de objetos extraterrestres de gran tamaño. Estos se habrían producido esporádicamente, delimitando lapsos intermedios más tranquilos que habrían provisto oportunidades para que la vida se originase, quizá más de una vez, para luego extinguirse.

Solamente después de los 3900-3800 Ma habrían existido condiciones que permitieron una evolución continua de organismos.

Es probable que la Tierra, a lo largo de su historia, haya tenido diferentes tipos de atmósferas. La atmósfera primitiva debe haber desaparecido cuando el Sol se estaba formando y el hidrógeno, el helio y otros gases livianos de la nebulosa original se perdieron en el espacio. Posteriormente, el vulcanismo y los cometas, mayormente originados en la proximidad de Júpiter, proveyeron suficientes gases y vapor de agua como para formar la atmósfera y los océanos. Esta atmósfera debe haber estado constituida por una mezcla de hidrógeno, dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua y cantidades reducidas de metano, amoníaco, ácido sulfhídrico y monóxido de carbono. Probablemente el efecto invernadero del dióxido de carbono sumado a la mayor radiactividad y flujo calórico del interior de la Tierra cooperaron para mantener caliente el exterior del planeta, en una época en la que la radiación solar era un 30% inferior a la actual.

En ese ambiente, o en uno más extremo vinculado a fuentes hidrotermales oceánicas, se habrían originado las primeras moléculas de carbono y posteriormente, mediante mecanismos no claramente establecidos, macromoléculas como el ácido ribonucleico (ARN), que sirvió como catalítico de reacciones químicas que dieron lugar a organismos celulares primitivos con capacidad reproductiva y metabólica, condiciones básicas de la vida.

Los primeros organismos unicelulares habrían sido así *anaerobios* (vivían en ambientes sin oxígeno), *heterótrofos* (se alimentaban de otros compuestos orgánicos) y *procariotas* (no tenían núcleo), similares a arqueobacterias actuales que pueden vivir en condiciones ambientales extremas.

Las evidencias que dan cuenta de estos acontecimientos son escasas. De los seres vivientes que murieron, la mayor parte se descompusieron o fueron consumidos por otros organismos y solamente una mínima cantidad se transformaron en fósiles, incorporándose a la litosfera.

Por otra parte, debido a que los organismos con partes duras fosilizables evolucionaron en los últimos 600 Ma, la mayoría de los fósiles conocidos corresponden a ese lapso, al tiempo que los organismos unicelulares y/o sin estructuras duras más antiguos no se preservaron, o fueron destruidos debido a que las rocas de esa época fueron recicladas por procesos geológicos o alteradas por elevadas presiones y temperaturas.

Sin embargo, es posible reconstruir esos acontecimientos a través de otras evidencias, basadas en estructuras y procesos biológicos actuales que fueron heredados de los primeros organismos que existieron en el planeta. Así, la comparación de secuencias moleculares (de nucleótidos de ADN o ARN) de formas vivientes permite determinar la proximidad relativa de los diferentes organismos y la secuencia de su diferenciación en el tiempo,

usualmente calibrada con respecto a la aparición (ubicada a 2000 Ma) de las células con núcleo (eucariotas). Así se ha determinado que el origen de la vida se ubica entre las bacterias comunes (eubacterias) y las arqueobacterias (*Archaea*), a por lo menos 3800-3900 Ma.

La naturaleza anaerobia heterótrofa de los primeros organismos, que crecían y se mantenían a expensas del material del cual se habían originado, debió modificarse, dada la imposibilidad de mantener un equilibrio entre la producción de nutrientes y el incremento en su consumo, a un régimen autótrofo (en el que se fabrican constituyentes a partir de fuentes alimentarias no vivientes), en el que se sintetizaban moléculas complejas (glucosa) a partir de compuestos más simples, mediante energía provista en un principio por reacciones químicas (quimioautótrofos) y luego por la luz (fotoautótrofos).

Algunos de estos primeros organismos vivieron quizá en las profundidades de la Tierra o de los océanos, a temperaturas de más de 100°C, procesando hierro, azufre e hidrógeno. La luz y el oxígeno no jugaban ningún papel en su metabolismo, ni requerían material orgánico. La disminución, en la cantidad e importancia de impactos extraterrestres y en la temperatura de la superficie, debe haber abierto la posibilidad de que algún mutante aislado, propio de ambientes relativamente menos cálidos, haya accedido a la superficie. De esta manera, bacterias anaerobias fotoautótrofas pudieron, en presencia de luz solar, sintetizar glucosa a partir de dióxido de carbono y ácido sulfhídrico geotérmico. Posteriormente la disociación del vapor de agua y del metano, causada por la radiación solar y la pérdida del hidrógeno del campo gravitacional de la Tierra, favoreció la combinación del carbono con el escaso oxígeno disponible y posibilitó la formación de los primeros organismos (cianobacterias) capaces de aprovechar esta fuente de carbono y producir oxígeno libre, que no existía en atmósferas más antiguas. Como el hidrógeno era raro y el agua abundante, las cianobacterias tendieron a incrementarse y se abrió la posibilidad para que ecosistemas altamente productivos se expandieran más allá de los ambientes explotados por autótrofos anaerobios.

El advenimiento de metabolismo aerobio significó una diversificación en las formas de vida, pues su aparición no eliminó fisiologías anteriores, de forma que el funcionamiento de los ecosistemas siguió dependiendo de los microorganismos anaerobios. Los metabolismos reductores y oxidantes, anaerobios y aerobios, heterotróficos y autotróficos, se vincularon en ciclos biogeoquímicos estrechamente relacionados.

Los fósiles más antiguos, conocidos con un grado aceptable de certeza, tienen 3465 ± 5 Ma y fueron registrados en la región de Pilbara, Australia occidental, en rocas ricas en sílice (ftanitas) del Basalto Apex (Grupo Warrawoona) y también en Sudáfrica (Grupo Onverwacht). Se trata de microfósiles, parecidos a bacterias y cianobacterias vivien-



Figura 2. Estromatolitos actuales, reserva natural de Hamilton Pool, Shark Bay, Australia. Fotografía de Paul Hamilton, Wikipedia Commons.

tes, que se hallaron en estructuras sedimentarias biogénicas (originadas a partir de formas vivientes), denominadas *estromatolitos*, compuestas de capas o láminas sucesivas de carbonato de calcio y material detrítico. Los estromatolitos se deben principalmente a la actividad de cianobacterias y se conocen desde el Precámbrico a la actualidad (figura 2), aunque su cantidad y diversidad comenzó a decrecer hace 1000 Ma hasta que pasaron a ser poco importantes hace 540 Ma (Cámbrico). Los microfósiles de Pilbara probarían que la evolución inicial de la vida fue muy rápida, ya que las cianobacterias, que producen y respiran oxígeno, coexistieron con bacterias más primitivas que no lo hacían. O sea que hace 3500 Ma ya existían los organismos que actualmente constituyen la base del ecosistema global.

Evidencias de vida con una antigüedad aun mayor existirían en la isla Akilia, Groenlandia, en rocas de 3830 Ma, pero no resultan concluyentes.

Otra prueba de la actividad de cianobacterias y de la modificación del contenido de oxígeno en la atmósfera la constituye las formaciones de hierro bandeado (Banded Iron Formation = BIF; figura 1), rocas sedimentarias laminadas en las que alternan capas de sílice con mayor y menor contenido en hierro, y que en la actualidad constituyen la reserva de hierro más importante del mundo. El hierro presente en estas formaciones habría sido precipitado por oxidación bacteriana de hidróxido ferroso presente en el agua, proveniente de fuentes hidrotermales del fondo oceánico. La inmediata captura del oxígeno producido por las cianobacterias habría mantenido su presencia en la atmósfera en un nivel

bajo. Se conocen BIF con edades que abarcan desde 3760 Ma (Isua, Groenlandia) hasta 2000 Ma, época en la que en los océanos no quedó más hierro disuelto. Esto es confirmado por otros indicadores, tal como la presencia de uraninita, pirita y siderita detríticas, que se oxidan y destruyen en presencia del oxígeno, en sedimentos fluviales y deltaicos de más de 2200 Ma, al tiempo que las areniscas rojas, típicas de ambientes oxidantes, comenzaron a ser más comunes.

La colonización de los ecosistemas marinos por las cianobacterias y su rápida diversificación a partir de 2400 Ma llevó a que el carbono orgánico pudiera ser sedimentado o convertido en metano en las profundidades oceánicas y permitió un rápido incremento del oxígeno atmosférico y la emergencia del mundo aerobio. Vinculados a estos acontecimientos se hallan evidencias de una glaciación y de un aumento del isótopo 13 del carbono respecto del estable, 12 ($\text{‰}^{13}\text{C}$) en carbonatos marinos, entre 2200 y 2058 Ma, denominada Evento Lomagundi. Todo ello habría coincidido con el fin de la fragmentación de un supercontinente (Kenorlandia), cuya conformación original dataría de 2700 Ma.

Eucariotas, pluricelularidad y sexualidad

Entre 2200 y 1900 Ma hubo un cambio importante en la atmósfera, cuando el nivel de oxígeno se incrementó por encima del 1% del nivel actual y se comenzó a formar la capa de ozono. Ello determinó que la cantidad de radiación ultravioleta que llegaba a la superficie

terrestre fuese disminuyendo y perdiendo peligrosidad, de forma tal que los organismos pudieron establecerse en aguas cada vez más superficiales. El aumento en el nivel de oxígeno resultó significativo desde el punto de vista orgánico, considerando la mayor producción de energía del metabolismo aerobio sobre el anaerobio a partir de igual cantidad de alimento.

Estos cambios se vieron acompañados por la aparición de las eucariotas (figura 1), que superaron el tamaño de las procariotas mediante un nuevo tipo de organización biológica. Una simbiosis de bacterias aeróbicas y cianobacterias, originalmente libres, dio lugar a pequeños órganos, mitocondrias y cloroplastos, encargados respectivamente del metabolismo oxidativo y de la fotosíntesis. De esta manera organismos originalmente discretos se integraron funcional y genéticamente en células que respiran oxígeno. Al mismo tiempo, la presencia de oxígeno produjo la evolución de enzimas antioxidantes protectoras del funcionamiento celular y causó el aislamiento de los cromosomas dentro de una doble membrana nuclear.

Así el oxígeno en la atmósfera impulsó la evolución de las células a una mayor complejidad, las eucariotas, que, sin reemplazar a las cianobacterias, llevaron a una renovada acumulación de la diversidad biológica y a la explotación de otras dimensiones del ecoespacio, con el consecuente incremento de la complejidad del ecosistema.

Aunque secuencias moleculares indican que las células eucariotas se habrían originado hace 2700 Ma, las primeras evidencias mencionadas están asociadas a estromatolitos y cianobacterias de la Gunflint Chert, del sur de Ontario, Canadá, con una antigüedad de aproxi-

madamente 2100 Ma, y los primeros casos claramente definidos provienen de rocas de China de 1700 y 1850 Ma (figura 1). De estas rocas de China (1700 Ma) también provienen las primeras algas rojas pluricelulares, originadas probablemente por agregado de células eucariotas, aunque las primeras identificables taxonómicamente han sido documentadas, asociadas con cianobacterias, en estromatolitos de 1198 ± 24 Ma hallados en la isla Somerset del ártico canadiense.

La aparición de organismos pluricelulares se explicaría como una solución al estancamiento adaptativo representado por el tamaño máximo alcanzado por los organismos unicelulares, más allá del cual una disminución de la relación superficie-volumen resulta incompatible con un aumento proporcional en los requerimientos de funciones (por ejemplo, la respiración) dependientes de la superficie.

Estas algas rojas pluricelulares tienen esporas/gametos indicativos de reproducción sexual, posible prerrequisito para la pluricelularidad, que posibilitó un incremento en la variedad y velocidad de la especiación (figura 1). La ventaja adaptativa del aumento en tamaño y complejidad, con especialización y división interna de actividades, se vio potenciada, en el caso del registro de la isla Somerset, por un nuevo elemento de los organismos fotosintéticos que vivían sobre el fondo marino, constituido por una estructura de fijación basal que posibilitó que los organismos crecieran verticalmente. Esto implicó una modificación sustancial del ambiente, afectando las corrientes del fondo, el transporte de sedimento y los intercambios químicos e interacciones biológicas, a lo que también contribuyeron bacterias y cianobacterias.

Figura 3. *Agarocrinus americanus*, crinoideo carbonífero, Indiana. Fotografía Vassil, Wikipedia Commons.



Figura 4. *Dickinsonia costata*, Ediacara, Australia. Wikipedia Commons.



La diversidad de las eucariotas se mantuvo baja entre 1600 y 1100 Ma, pero se incrementó, conjuntamente con la de los *acritarcos* (grupo taxonómico que agrupa restos de microalgas de afinidades biológicas inciertas) entre los 1100 y 900 Ma, para declinar nuevamente entre 900 y 600 Ma, en coincidencia con cuatro períodos de enfriamiento global. Estos se atribuyen a una disminución del contenido de dióxido de carbono e incremento relativo del oxígeno en la atmósfera (a 5% del nivel actual), causados por la aparición de los animales pluricelulares (metazoos), que se convirtieron en productores eficientes de carbón orgánico, probablemente también vinculado con la formación y fragmentación de un supercontinente (Rodinia, 1300-800 Ma). La caída en la diversidad y cantidad de estromatolitos, ocurrida también en este lapso, puede haber estado relacionada tanto a la reducción de la temperatura como a la alteración de la estabilidad del sustrato que produjeron los metazoos.

De los primeros metazoos a la esqueletización

Recién hace unos 600 Ma apareció, según el registro fósil, la vida altamente organizada de los animales pluricelulares (figuras 1 y 5), aunque estudios de secuencias moleculares indican que ello habría sucedido entre 800 y 1000 Ma. La aparición tardía de los metazoos, con respecto a los vegetales pluricelulares, se explicaría por su mayor complejidad, evidenciada en un número más

grande de tipos diferentes de células y tejidos, y puede haber sido causada por la continua acumulación de oxígeno en la atmósfera, la oxigenación de aguas oceánicas profundas y una mayor productividad vegetal debida a un aumento en la disponibilidad de nitratos originada en un ciclo de retroalimentación positiva.

Los primeros metazoos están documentados por la denominada 'fauna de Ediacara' (620-550 Ma) (figura 4), descrita por primera vez sobre la base de evidencias halladas en las montañas Flinders, cerca de Adelaida, en el sur de Australia, y posteriormente registrada también en África, América, Europa y Asia. Esta fauna se extiende desde la finalización de la última glaciación del Precámbrico hasta la base del Fanerozoico e incluye un total de más de cien especies y varios miles de individuos, formados exclusivamente por tejidos blandos que permitían la respiración por difusión. Algunos se parecen a medusas o a gusanos, y otros son difíciles de ubicar en relación con animales modernos. Probablemente muchos de ellos representan organismos sin descendientes conocidos, pero su importancia reside en que representan los primeros experimentos de vida animal pluricelular, que llevó, mediante diferenciación ontogenética, a una división del trabajo entre las células. Características salientes de esta fauna son: carácter cosmopolita, rápida radiación inicial seguida de una baja velocidad evolutiva, bajo número de especies con relación al de grupos mayores, dominancia de celenterados y de formas con simetría radial, formas con simetría bilateral mayormente con segmentación, superficies grandes en relación al volumen (probablemente para facilitar la respiración), organización en cadenas tróficas cortas, concentración en ambientes marinos superficiales, reducida cantidad de formas viviendo dentro del sedimento (infauna) y de depredadores y abundancia de organismos suspensívoros y detritívoros que se alimentaban, respectivamente, de partículas orgánicas que estaban en suspensión en el agua y en los sedimentos.

El mayor cambio hacia la vida animal moderna, que comenzó en el medio acuático hace 540 Ma (principios del Cámbrico), tras la desaparición de la 'fauna de Ediacara', corresponde al rápido desarrollo de invertebrados complejos con partes duras, en coincidencia con un incremento del nivel de oxígeno (a 10% del nivel actual). Esto abrió el camino a una carrera evolutiva al posibilitar, por un lado, la fijación muscular, que produjo una mayor movilidad y el desarrollo de depredadores activos y, por otro, la existencia de estructuras protectoras representadas por conchillas externas mayormente calcáreas.

El registro comprende los principales materiales y tipos esqueléticos y los grupos mayores de organismos pluricelulares que producen esqueletos en la actualidad, los que luego darían lugar a infinidad de variaciones a lo largo del Fanerozoico (figuras 3 y 6). No obstante, muchas de las primeras variaciones se extinguieron,

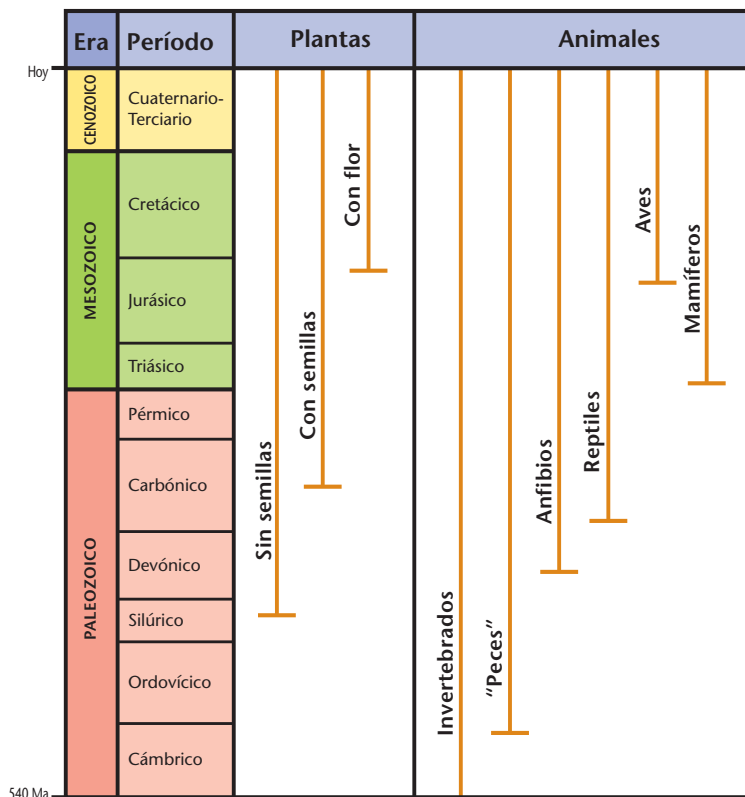


Figura 5. Distribución temporal de los principales grupos de plantas y animales durante los últimos 540 Ma.

debido quizá a su inferioridad competitiva, imposibilidad de adaptarse a cambios ambientales y organización con poco potencial para la diversificación.

El hecho de que los primeros organismos pluricelulares estuvieran apoyados o fijados en el fondo de mares relativamente poco profundos habría generado la existencia de un eje (arriba-abajo) que habría determinado una simetría radial. A partir de allí, en la medida que los organismos se movilizaban en busca de comida y el aparato de alimentación se localizó en el lugar de encuentro, se definió una organización corporal con una superficie frontal y una posterior y la concentración en la primera del sistema nervioso, con desarrollo de una cabeza y ojos –inicio de la cefalización–. Al mismo tiempo la ausencia de una fuerza, similar a la de la gravedad pero actuando en sentido horizontal, generó la existencia de órganos pares, como los ojos. La resultante de todos estos cambios fue la superación de la simetría radial por la bilateral. Es posible además que la centralización progresiva del sistema nervioso de los animales haya estado también vinculada al incremento en tamaño y a la consecuente necesidad de una mayor coordinación que mantuviese la armonía funcional de las partes.

Se originó así, a principios del Paleozoico, un amplio rango de diseños adaptativos básicos, cuya funcionalidad fue probada posteriormente, a través del espacio y el tiempo, y sobre los cuales se producirían numerosas variaciones con frecuente producción de estructuras homólogas y análogas, o sea con una misma función adaptativa, pero originadas, respectivamente, en idénticos o diferentes órganos/linajes ancestrales. Se generaron así paralelismos, convergencias y repeticiones funcionales que muestran claramente que los organismos están condicionados por las propiedades físicas y químicas del planeta. Así los miembros anteriores de los vertebrados sirvieron para caminar, trepar, nadar o volar, los marsupiales y los mamíferos placentados desarrollaron morfologías similares, apéndices con músculos que sirven para la locomoción rápida y la manipulación aparecieron en artrópodos y tetrápodos, ojos con párpados, córnea, iris, lente y retina en cefalópodos y humanos, aletas y colas para la propulsión en el agua en peces y en mamíferos (ballena), alas para el vuelo en insectos, reptiles (pterosaurios), aves y ciertos mamíferos (murciélagos). En los casos en que determinadas variaciones morfológicas y/o fisiológicas resultaron en estancamientos evolutivos y extinción, se produjeron alternativas mediante nuevos puntos de partida desde estados más generalizados de la ontogenia, por *pedomorfosis* (cambios mediante los cuales el adulto de una especie retiene caracteres juveniles de un ancestro), debido a la acción de una red compleja y jerárquica de genes reguladores (o supergenes). De esta manera la evolución fue condicionada por modificaciones en el programa de desarrollo de los organismos.



Figura 6. *Kolihapeltis* sp, trilobite devónico, Marruecos, Museo de Melbourne. Fotografía Peter Halasz, Wikipedia Commons.

El tamaño máximo quedó limitado exclusivamente por la resistencia mecánica o los requerimientos funcionales de los sistemas de órganos. Aparecieron nuevos modos de alimentación, y el impacto de los hábitos de vida de los metazoos grandes sobre las condiciones físicas de la interfase sedimento-agua y la nueva escala de empaquetamiento de nutrientes orgánicos modificó el ambiente para procariotas y eucariotas unicelulares, creando oportunidades para otros organismos (parásitos, patógenos, detritívoros). Se abrió así camino a un incremento de la complejidad en las comunidades y ecosistemas, que a lo largo del Fanerozoico estarían centradas más en aspectos ecológicos que morfológicos. Animales con altas necesidades de energía y depredadores más sofisticados reemplazarían a antecesores con menos requerimientos metabólicos y especialización.

La evolución de las faunas en el límite Precámbrico-Cámbrico (540 Ma) se ha relacionado a cambios físico-químicos del ambiente, producidos por la posible separación de bloques continentales con formación de cordilleras oceánicas y desarrollo de transgresiones importantes (aumentos del nivel del mar), todo lo cual habría incrementado tanto el área habitable para la vida en aguas marinas poco profundas como el desarrollo de faunas endémicas. Importantes cambios en la química oceánica han sido registrados en mediciones de isótopos de azufre ($\text{‰}^{34}\text{S}$) en evaporitas de esa edad, que muestran

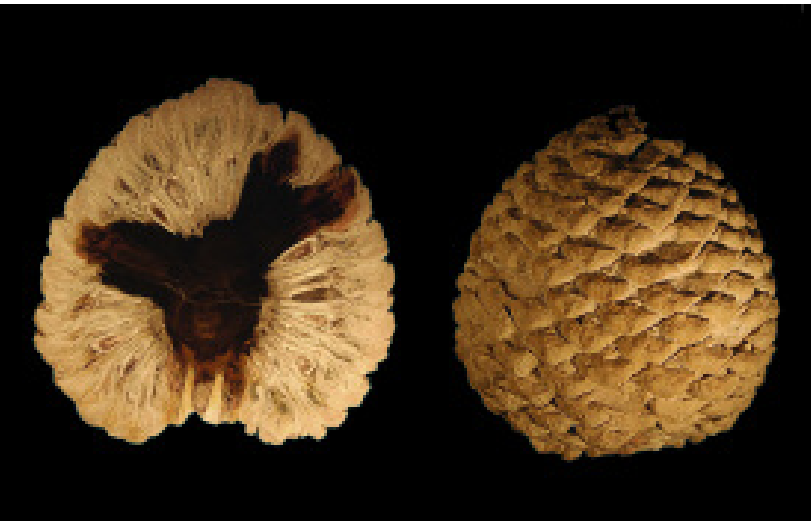


Figura 7. Arriba: Piña petrificada de araucaria jurásica, Patagonia. Fotografía Mila Zinkova, Wikipedia Commons.

Abajo: Helecho con semilla del Triásico, Mendoza.



Figura 8. Troncos de araucarias del Jurásico, bosque petrificado, Santa Cruz.

una excursión positiva (evento Yudomski, 700-550 Ma) indicativa de que importantes cantidades de aguas marinas, isotópicamente pesadas, fueron introducidas por algún tipo de surgencia, propia de la evolución de las cuencas, en áreas de formación de evaporitas. Estas aguas pesadas provendrían de una acumulación progresiva y prolongada, en cuencas angostas profundas formadas en una fase temprana de desmembramiento continental, de salmueras producidas por fraccionamiento bacteriano de azufre.

El evento Yudomski coincide en parte con un episodio importante de fosfogénesis, evidenciado por importantes depósitos de fosfatos y la composición de muchos esqueletos, que habría elevado los niveles de productividad orgánica y promovido el incremento de radiaciones evolutivas. Estas inferencias sobre la productividad oceánica han sido también confirmadas por cambios en las relaciones de isótopos de carbono ($\text{‰}^{13}\text{C}$). Esto podría deberse al almacenamiento de materia orgánica, rica en carbono de origen fotosintético, en ambientes anóxicos y el hecho de estar vinculado a la formación y destrucción de cuencas marinas como las mencionadas. También se ha observado una variación en la precipitación inorgánica de polimorfos (formas o estructuras cristalinas diferentes) de carbonato de calcio, de aragonita en el Precámbrico tardío a calcita en el Cámbrico, que se debería a procesos vinculados a la tectónica de placas. Estos incluyen alteración hidrotermal en áreas de separación (deriva) de placas de la corteza, que reducen la relación magnesio-calcio del agua de mar y la deposición de carbonatos en mares poco profundos en relación a la erosión de estos en áreas continentales.

Colonización de la Tierra

Uno de los acontecimientos más importantes en la historia de la vida fue la colonización de las áreas continentales, donde los organismos fotoautotróficos debieron pasar a obtener energía del sol y nutrientes y agua del sustrato en un escenario fisiológicamente exigente, caracterizado por un alto riesgo de deshidratación. Este paso tuvo un gran impacto sobre el avance evolutivo de la geósfera y la atmósfera.

Probablemente la colonización del ámbito terrestre por las plantas se hizo posible después del desarrollo de una asociación simbiótica entre un alga verde semiacuática y un hongo acuático que habría colonizado ambientes pobres en nutrientes, explotando grandes volúmenes de sustrato, o debido a que un grupo de algas acuáticas quedó en tierra luego de una caída del nivel del mar y que, mutaciones mediante, sobrevivió y desarrolló caracteres resistentes a la desecación. Posteriormente otras innovaciones fisiológicas estabilizaron, para fines del Devónico (con un nivel de más de 15% de oxígeno, figura 13), esta expansión ecológica de las plantas en un ambiente inicialmente hostil: órganos sexuales especializados, sistema vascular dual para transporte de fluidos, tejidos estructurales para lograr estabilidad, estructuras epidérmicas para intercambio de gases respiratorios y raíces de diferentes tipos para la toma de nutrientes, diversos órganos portadores de esporas, semillas y estrategias de reproducción y dispersión cada vez más perfeccionadas.

Ambientes terrestres húmedos fueron ocupados durante el Ordovícico tardío por algunas plantas, simila-

res a musgos, sin sistema vascular y luego, durante el Silúrico, por las primeras plantas vasculares que en su mayoría no tenían semillas y carecían de mecanismos adecuados para propagarse en ambientes secos (figura 5). Posteriormente, en el Devónico tardío-Carbonífero, se desarrollaron plantas más avanzadas con semillas (figuras 7 y 8), que pueden resistir condiciones adversas y tienen una reserva de alimento, lo cual permitió la reproducción en ambientes secos y la conformación de verdaderos bosques, y finalmente, en el Jurásico tardío-Cretácico temprano, la aparición de flores (angiospermas), con una amplia gama de colores y semillas protegidas, cuya fecundación fue asegurada por la coevolución con insectos y aves.

La colonización de las regiones continentales por las plantas modificó el paisaje y abrió el camino a los animales. Hasta entonces estas áreas habían estado sujetas a erosión por acción del viento y el agua, pero la formación de una cubierta biológica produjo cambios en los niveles de oxígeno y dióxido de carbono en la atmósfera y de ácidos orgánicos en el suelo, todo lo cual tuvo impacto en los procesos de meteorización. Las matas microbianas primero y las raíces después constituyeron un agente de cobertura importante que redujo la velocidad de erosión, al tiempo que posibilitaron que los materiales meteorizados permanecieran más tiempo en el suelo y sufrieran una mayor descomposición. Para el Carbonífero temprano el ecosistema del suelo había evolucionado hasta producir tipos de humus idénticos a los que se encuentran en la actualidad. La interacción de las plantas con el suelo se completaría, a principios del Terciario (Eoceno-Oligoceno), con la aparición de los pastizales modernos que hoy en día cubren el 30 % de las superficies continentales.

Tras la colonización del medio terrestre por las plantas, numerosos animales pasaron al agua dulce y de allí a ambientes húmedos, pero solo cinco grupos de metazoos alcanzaron gran diversidad y una total adaptación al ámbito terrestre: tres grupos de artrópodos (arácnidos, miriápodos e insectos) entre el Silúrico y el Devónico, los cordados tetrápodos en el Devónico tardío y los gastrópodos pulmonados en el Carbonífero.

Con el incremento en tamaño, estos organismos aerobios debieron adaptarse para que sus tejidos recibieran el oxígeno necesario para su subsistencia. Así, de un tipo de respiración por difusión a través de los tejidos se pasó al desarrollo de órganos internos, como tráqueas en los insectos y sistema circulatorio con incremento diferencial de superficie como los pulmones de los vertebrados. Como las tráqueas se vuelven ineficientes para la difusión directa del oxígeno a medida que crece su longitud, el tamaño de los insectos se vio limitado y solamente pudieron superar tales límites en épocas en las que se incrementó la concentración de oxígeno en la atmósfera, por ejemplo, en el Carbonífero.

Niveles adecuados de oxígeno también habrían facilitado el vuelo, primero a los insectos y posteriormente a los reptiles en el Triásico, aves en el Jurásico tardío y mamíferos en el Eoceno.

Los anfibios, que carecen de un medio adecuado para proteger los embriones de la desecación, ya en el Carbonífero habían desarrollado una articulación locomotriz más eficiente de los miembros y pudieron vivir y reproducirse con reducida dependencia del agua. Con la aparición, también en el Carbonífero, de los huevos con cubierta gruesa que evitan la desecación, se posibilitó la reproducción fuera del medio acuático, lo que permitió a los reptiles (figuras 1, 5 y 9) colonizar el ámbito terrestre, incorporar la dieta herbívora y desarrollar el bipedalismo.

La evolución coordinada, total o parcial, de especialización de la dieta y mayor eficiencia en el procesamiento de la comida, locomoción más activa y rápida, regulación interna de la temperatura (homeotermia), presencia de plumas o pelos aislantes, retención del embrión dentro de la hembra, corazón y pulmones más eficientes para la oxigenación, permitió a nuevos grupos ampliar sus oportunidades para capitalizar el ecoespacio terrestre, lo cual condujo a la evolución de las aves y los mamíferos (figuras 1, 5 y 10). Estos últimos se originaron en el Triásico tardío (210 Ma) y estuvieron representados por especies nocturnas del tamaño de ratones, que, para evitar a los dinosaurios carnívoros, desarrollaron sistemas auditivos, visuales y olfativos más sensibles, y un cerebro más evolucionado. Todo lo expuesto permitió la formación de ecosistemas nuevos y complejos, con modos de vida desconocidos en los océanos, a pesar de la limitada diversidad de los niveles superiores de la vida terrestre.

La importancia que adquirieron las plantas vasculares, entre 375-275 Ma (Carbonífero y Pérmico) incrementó la producción global de carbono orgánico, que causó un aumento importante del nivel de oxígeno (figura 13). Esto quedó reflejado, para ese lapso, en la mayor abundancia de carbón que se registra en la historia de la Tierra. La disminución en el nivel de dióxido de carbono y la formación y ubicación del supercontinente Gondwana en una posición próxima al Polo Sur resultó en una caída global de la temperatura. Los niveles de oxígeno atmosférico habrían alcanzado el 35%, pero su inflamabilidad habría sido controlada por una mayor proporción de nitrógeno en la atmósfera. La formación de carbón, el almacenamiento orgánico y la producción de oxígeno disminuyeron a fines del Pérmico, probablemente debido a la caída del nivel del mar y a una emergencia generalizada de los continentes.

A través de los últimos 65 Ma, luego de la fragmentación de supercontinentes preexistentes (Laurasia y Gondwana), iniciada en el Jurásico tardío-Cretácico temprano, las diferentes masas continentales y la fauna



Figura 9. Dinosaurio ornitisquio, Jurásico superior, Santa Cruz.

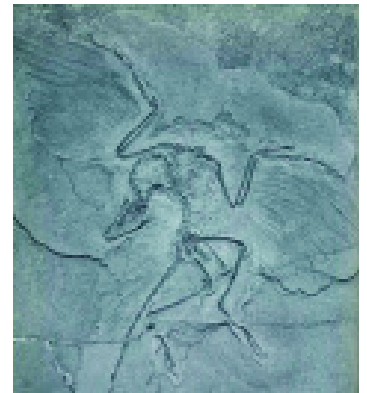


Figura 10. Ave (*Archaeopteryx lithographica*) de fines del Jurásico, Alemania.

y la flora fueron adoptando la distribución actual, estas últimas con algunas variaciones temporales condicionadas por fluctuaciones climáticas o por separación de continentes. En este último caso, el aislamiento total o parcial que tuvieron Australia y América del Sur explica la existencia en estas de faunas continentales endémicas cenozoicas relativamente primitivas. En lo que hace a variaciones climáticas, una modificación atmosférica importante se produjo hace 55 Ma, en el Eoceno, cuando una enorme liberación de carbono y/o metano, proveniente de depósitos de hidratos de metano (clatratos, producidos por degradación bacteriana de materia orgánica en ambientes anaerobios), existentes en el fondo de los océanos o de depósitos de carbón expuestos al vulcanismo, produjo una importante elevación de la temperatura. Finalmente una serie de glaciaciones se han registrado en el Pleistoceno, con probabilidad originadas en variaciones cíclicas de la órbita de la Tierra (ciclos de Milankovitch) combinadas con cambios en los niveles de dióxido de carbono.

Inteligencia y tecnología

El paso siguiente en la evolución de la biosfera está caracterizado por la aparición de la inteligencia y la tecnología, cuya existencia representa, en el contexto que se viene analizando, un período extremadamente breve.

Pese a que las características básicas de la inteligencia humana están presentes en algún grado en otros organismos, la combinación de lenguaje, pensamiento y expresión simbólica y tecnología son características únicas de los humanos, que han abierto el camino a la explotación intensiva del ecosistema global, con la posi-

bilidad incluso de modificar la faz de la Tierra y de otros planetas. Los organismos celulares primitivos no tenían sistema nervioso, las primeras formas pluricelulares tuvieron sistemas nerviosos simples (560 Ma) y finalmente los vertebrados desarrollaron cerebros, cada vez más grandes y complejos, hasta llegar, hace unos 250.000 años, al *Homo sapiens*. En esta especie la mano prensil, que en los primates apareció asociada a la visión estereoscópica, como adaptación a la vida arbórea, abrió el camino al uso de instrumentos y se transformó de moldeadora de objetos a reveladora del ordenamiento subyacente en la naturaleza.

La evolución de la inteligencia que acompañó este proceso puede ser medida por el grado de encefalización (cantidad de masa cerebral que excede a aquella que guarda relación con la masa total del cuerpo), que se correlaciona con la complejidad del cerebro, especialmente expresada en el neocórtex. Así, especies altamente encefalizadas tienen un cerebro más grande que lo esperado para el tamaño de su cuerpo (siete veces en el caso de los humanos) y tienden a ser más inteligentes. El desarrollo de una mayor inteligencia permitió que a la transmisión de información genética a los descendientes se sumase un legado cultural, de acción mucho más rápida, consistente en información, adquirida o aprendida. La condición previa para ello fue el desarrollo de un lenguaje verbal sintáctico. Así, la acumulación de experiencia, posibilitada por el registro de ideas e información, y el desarrollo sistemático de la educación le han permitido a la humanidad superar, proyectándose hacia el futuro, la limitación a la experiencia inmediata que tienen, para el aprendizaje, otros organismos.

El resultado es un sistema tecnológico en el cual los humanos adaptan los ambientes a sus necesidades y no a

la inversa. La velocidad de este cambio supera la de la evolución biológica y, por más que la inteligencia y la tecnología estén limitadas a una sola especie, sus efectos se extienden a toda la biosfera. Esta capacidad para invadir y manipular todos los ambientes, incluyendo los más hostiles, y la misma vida, que significa una continuidad en el incremento de la utilización del espacio, ha producido cambios ambientales globales, con destrucción de ambientes y vida, y disminución de la diversidad biológica y de la complejidad del ecosistema.

Es de notar que ligada a la inteligencia y a la experiencia nació la ética, facultad basada en el libre albedrío o capacidad de hallar y elegir alternativas, que requiere pensamiento abstracto y anticipación del futuro y en la cual es crucial la distinción entre leyes naturales y normativas, o *dualismo crítico*. Pese a ello, el crecimiento desmedido de la población y la explotación y alteración descontrolada del medio ambiente primario han creado la posibilidad cierta de que se termine afectando a la misma especie, a través de la destrucción de los equilibrios ecológicos, el colapso poblacional y la extinción definitiva.

Extinciones

A través de por lo menos 3500 Ma una serie de organismos con diferentes niveles de complejidad han integrado ecosistemas, cuyo conjunto ha determinado la evolución de la biosfera. Los procesos evolutivos ocurridos en ese lapso, basados en la selección natural que actúa sobre la variabilidad originada en las mutaciones y la reproducción sexual, han dado lugar a la aparición de numerosas especies. En este contexto, han existido sin

embargo lapsos relativamente breves –llamados *de radiación*– en los que hubo una aceleración de los procesos evolutivos, con aparición de numerosas especies y grupos que ocuparon nichos ecológicos que se encontraban vacantes, sea por no haber sido previamente ocupados, como es el caso de la radiación de los metazoos en el Cámbrico, o por haber quedado disponibles secundariamente, como sucedió con los mamíferos en el Cenozoico luego de la extinción de los dinosaurios.

La mayoría de las especies, por disminución de recursos, densidad excesiva y disminución de fertilidad, han sufrido colapsos poblacionales que eventualmente las han llevado a la extinción (extinciones normales o de fondo). A diferencia de este tipo de extinción, han existido otras, producidas en lapsos relativamente breves, que han afectado en forma conjunta a porcentajes importante de especies. Tales extinciones, denominadas *en masa*, en unos pocos miles de años redujeron la diversidad de la vida, de forma tal que muchas plantas y animales nunca pudieron recuperar su anterior importancia o se extinguieron, como sucedió con los dinosaurios al final del Cretácico (figura 12).

Las extinciones en masa afectaron a formas de vida, en general más complejas, representadas exclusivamente en los últimos 650 Ma. Las más importantes o de primer orden (figura 13) comprenden la que afectó a los metazoos del Precámbrico tardío (650Ma) y las registradas en la terminación de los períodos Ordovícico, Devónico, Pérmico, Triásico y Cretácico.

Estas extinciones han sido atribuidas a cambios ambientales importantes debidos tanto a causas terrestres como extraterrestres y para cada una de ellas hay alguna hipótesis explicativa que cuenta con una mayor



Figura 11. Crustáceo cretácico, Líbano. Foto: Mila Zinkova, Wikipedia Commons.



Figura 12. Ischigualasto, importante localidad fosilífera, provincia de San Juan.

aceptación. Las terrestres incluyen cambios del nivel del mar, modificaciones en el clima y episodios de incremento de vulcanismo. La primera de ellas es la más aceptada y usualmente se halla asociada a la tectónica de placas, con regresiones marinas que producen pérdida de hábitat y destrucción de estuarios (fuente primaria de nutrientes), cambio en el albedo (cantidad de luz solar reflejada) terrestre con incremento de estacionalidad e importantes fluctuaciones climáticas. Estos efectos se ven potenciados por la posterior elevación del nivel de mar, que produce dispersión de aguas anóxicas profundas sobre mares epicontinentales.

Las causas extraterrestres incluyen colisiones con cometas, meteoritos u otros cuerpos extraterrestres (figura 13), variación en radiación solar, incremento de rayos cósmicos y rayos gama debido a supernovas cercanas o al paso del Sistema Solar por el plano de la galaxia.

Las extinciones en masa también se han atribuido a una combinación de varios de los factores citados o a una coincidencia casual de varios de ellos o de extinciones normales.

Una de las extinciones más importantes se produjo a fines del Pérmico, hace unos 250 Ma (figura 13). Las rocas sedimentarias muestran para ese momento una importante variación en la relación de isótopos de carbono, indicativa de cambios importantes en la química oceánica y atmosférica, en un lapso de aproximadamente 164.000 años. Esta extinción ha sido atribuida al impacto de un cuerpo extraterrestre, pero las evidencias no son concluyentes y se ha considerado más probable que, al igual que la del límite Triásico-Jurásico, esté relacionada con episodios de vulcanismo masivo (en el primer caso representado en Siberia con una extensión de efusiones volcánicas de 3,9 millones de km² y en el segundo, en la región del Atlántico central con 7 millo-

nes de km²). El acontecimiento volcánico del fin del Pérmico, que estuvo precedido por una caída del nivel del mar (figura 13) vinculada a la formación del supercontinente Pangea, produjo un incremento en el contenido atmosférico de dióxido de carbono, dióxido de azufre y quizá de metano –proveniente de carbón o clatratos intruidos por diques basálticos–, con calentamiento global, estancamiento de la circulación oceánica y formación de ambientes anóxicos.

La extinción ocurrida en el límite Cretácico-Terciario (65 Ma) parece haber sido causada por el impacto de un meteorito de grandes proporciones en la península de Yucatán, México, donde se ha registrado un cráter (Chicxulub) de 150-180km de diámetro, producido por un objeto de unos 10-20km de diámetro, cuya edad de formación es aproximadamente coincidente. Prueba de este hecho sería una capa de iridio, elemento raramente presente en las rocas de la corteza terrestre pero comparativamente abundante en meteoritos, registrada globalmente en el límite Cretácico-Terciario, que habría sido depositado en forma de lluvia luego de que la fuerza de la colisión lo reinyectara en la estratosfera. Coincidentemente se han detectado vidrios (tectitas) (figura 14), cuarzo alterado (metamorfizado) y un mayor porcentaje de carbón gráfico atribuido a incendios, que se habrían producido por el impacto. Asimismo, dado que hay evidencias de fluctuaciones climáticas importantes entre 71 y 63,6 Ma, lapso para el que se han inferido dos acontecimientos de efecto invernadero importantes, con incrementos en dióxido de carbono y temperatura, es factible que la extinción del Cretácico también pueda atribuirse a cambios previos del nivel del mar asociados con vulcanismo masivo, ya que depósitos volcánicos de esa edad se encuentran en la India en una extensión de 4 millones

de km². En este caso el enriquecimiento de iridio podría provenir de rocas del manto eyectadas durante las erupciones y las alteraciones climáticas se deberían a los gases introducidos en la atmósfera.

En cualquier circunstancia es importante tener presente que los impactos cósmicos son ejemplos de sucesos contingentes, ajenos a la biología terrestre, y no guardan relación con la evolución de la vida sobre la Tierra, salvo por la posible incidencia en la producción de vacancias y reemplazo de incumbencias y en su velocidad (retraso o aceleración).

Perspectiva

De todo lo expuesto surge que la vida muestra un alto grado de ordenamiento (entropía negativa) y que tanto el metabolismo como la reproducción han sido condicionados por el ambiente, originado en última instancia en procesos de orden cósmico. De esta manera, dadas las condiciones de nuestro planeta, tales como la gravedad, la composición de la litosfera, hidrosfera y atmósfera, la temperatura y disponibilidad de materiales y energía, la vida solamente pudo evolucionar en un limitado número de direcciones y formas, en las cuales, mediante nuevas variaciones, se abrió el camino a la utilización óptima de las posibilidades existentes. La resultante fue un aumento en diversidad, acompañado por una utilización mayor del ecosistema, donde los nuevos grupos mostraron un incremento en complejidad geológica y morfológica.

Existe sin embargo un claro contraste entre el Precámbrico y el Fanerozoico, pues en aquel el camino de la evolución parece llevar a la generalización y la supervivencia prolongada, mientras que en este parece conducir a la especialización y la extinción.

Así la base del ecosistema sigue siendo bacteriana y los microorganismos han sido y son las formas más abundantes del planeta, revisitando una importancia fundamental en los ciclos biogeoquímicos globales. En tal sentido cabe mencionar que se estima que la cantidad de cianobacterias en los océanos es actualmente de 10²⁷, cifra que no habría variado sustancialmente a través del tiempo, y que su morfología ha cambiado muy poco, pues prácticamente todos los fósiles pueden ser ubicados en géneros vivientes y un 40% es indistinguible de especies actuales. La comunidad de microorganismos existente en los sedimentos y en la cor-

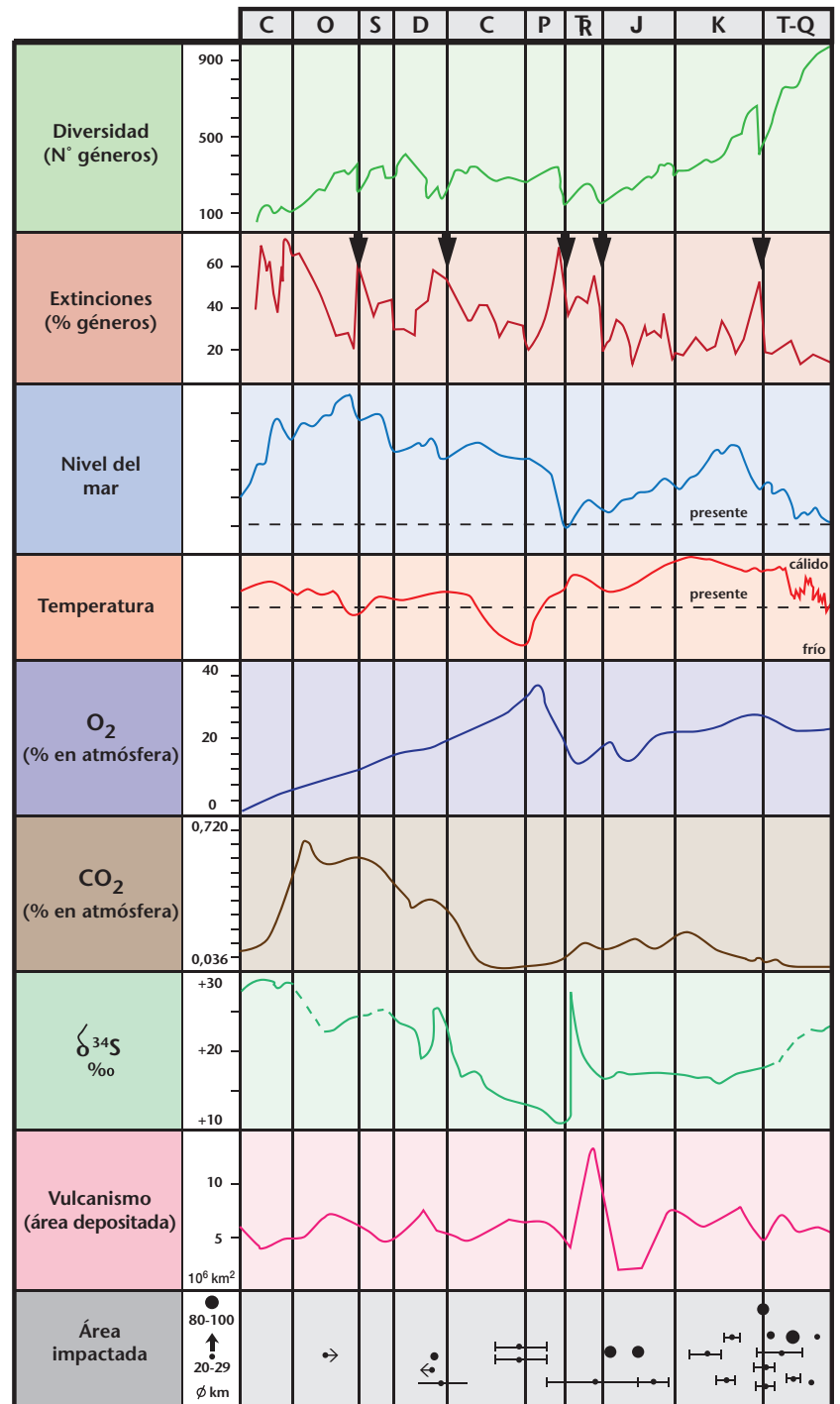


Figura 13. Variaciones en la diversidad biológica, medida en número de géneros, y de las extinciones de los organismos (% de géneros), ambos en relación a los valores existentes de diferentes parámetros ambientales durante los últimos 540 millones de años. C, Cámbrico; O, Ordovícico; S, Silúrico; D, Devónico; C, Carbonífero; P, Pérmico; Tr, Triásico; J, Jurásico; K, Cretácico; T-Q, Terciario-Cuaternario.

teza de los fondos oceánicos, dos de los hábitat más extensos del planeta, ciertamente juega un papel importante en reacciones químicas que antes se consideraban abióticas, incluyendo el ciclo del hierro y el azufre, al igual que en el balance global del carbono y en la existencia de concentraciones masivas de metano. Es probable que también intervengan en el ciclo del nitrógeno, en la acidez-alcalinidad (pH) oceánica y en el intercambio de oxi-

dantes y reductores entre el manto, la corteza y las aguas oceánicas. O sea que la biosfera de los fondos marinos afectaría ciclos biogeoquímicos globales, influiría en procesos y propiedades de los océanos y la atmósfera y, en última instancia, en el clima, la evolución de la biosfera global y la estructura y función de la litosfera.

Llegados a este punto cabe preguntarse cuáles son las perspectivas futuras de la interacción Tierra-Vida.

Visto el tema en una perspectiva terrena todo indica que, por más que sean justificados nuestros temores acerca de especies en peligro y pérdida de biodiversidad, la vida en su totalidad se encuentra firmemente establecida en nuestro planeta. A través del tiempo la Tierra ha interactuado favorablemente con la vida. Hasta acontecimientos biodestructivos con influencia global, como pueden haber sido los impactos de cuerpos extraterrestres relativamente grandes, por más que hayan destruido muchas especies, no han eliminado la biosfera por al menos 3500 Ma. En definitiva todo indica que la vida sobrevivirá por un lapso similar, salvo que se produzcan acontecimientos catastróficos no registrados en 3500 Ma, hasta antes de que el Sol, convertido en una estrella gigante roja, destruya a la Tierra.

Esto sin embargo no significa que mientras tanto los humanos puedan sobrevivir en la Tierra a cualquier tipo de catástrofe ambiental. Determinados acontecimientos podrían producir alteraciones que, aun en el caso de que algunos sobreviviesen, causarían el fin de la civilización. En tal sentido hay estimaciones estadísticas que indican que la supervivencia futura de la especie humana se encuentra entre un mínimo de 5100 años y un máximo de 7,8 Ma.

Puestos en este punto y dado que existen hechos y tendencias cuyo desarrollo y consecuencias se producen y producirán en escalas que son ajenas y escapan a las actividades y posibilidades del ser humano, resulta fundamental, en primer lugar, distinguirlos de otros originados en acciones humanas de corto alcance y, en segundo, explorar la factibilidad que existe, como mínimo, de planificar la supervivencia de la civilización.

En tal sentido es importante considerar que el impacto de las actividades humanas debería ser evaluado no sólo con relación a la emisión de dióxido de carbono y sus efectos climáticos, sino también en relación a una

gama más amplia de aspectos de índole geológica. Como ejemplo poco conocido, es posible mencionar que la humanidad se ha convertido en el primer agente geomórfico o de erosión en los últimos 1000-1500 años. Las actividades humanas tales como la agricultura y la urbanización, que involucran el transporte de sedimentos y rocas, han rebajado las superficies continentales en porcentajes sustancialmente mayores que la denudación media natural.

Paralelamente y ante la posible presencia de sucesos inevitables originados en la mecánica del planeta, en la acción descontrolada de la humanidad o en ámbitos extraterrestres, la especie humana está en condiciones de explorar la factibilidad de usar su inteligencia y tecnología para colonizar otros cuerpos del Sistema Solar. Llegar en cambio a otros planetas de la galaxia no es una posibilidad inmediata, si se considera que el más próximo (Gliese 481c) con condiciones similares a las de la Tierra se encuentra a 20,4 años luz.

En este contexto cabe considerar hasta qué punto es posible la supervivencia de la vida, especialmente la inteligente, más allá de la Tierra. Todo indica que en el Sistema Solar ello depende fundamentalmente de las actividades que se originen en el planeta pues si existe alguna forma de vida en otro, seguramente estaría representada por microorganismos. Fuera del Sistema Solar es muy probable que se repita la misma situación, aunque no puede descartarse la posibilidad de hallar evidencias de vida inteligente. Pues, dado que el Sol es una estrella típica y considerando que existen millones de estrellas similares, es posible que aunque solo unos pocos de los planetas de otros sistemas y galaxias posean condiciones apropiadas, algunos de ellos haya dado lugar a formas vivientes y a seres inteligentes.

Estas perspectivas son, en definitiva, las que han llevado al optimismo humano a mirar más allá de la Tierra. Así la nave espacial Pioneer 10, lanzada el 2 de marzo de 1972 y que quedó fuera de contacto radial el 1 de abril de 1997 cuando estaba a 10.000 millones de kilómetros, incluyó un mensaje (figura 15) que, aunque no cumpla su misión, expresa la convicción de que la vida es universal y seguirá existiendo, al margen del destino de la vida en el planeta Tierra. **CH**

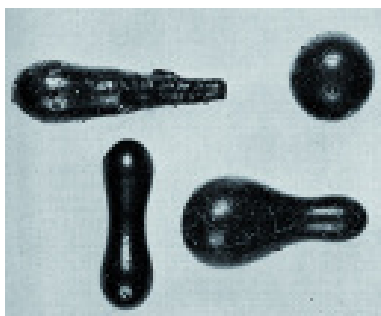


Figura 14. Tectitas producidas por el impacto de un meteorito.

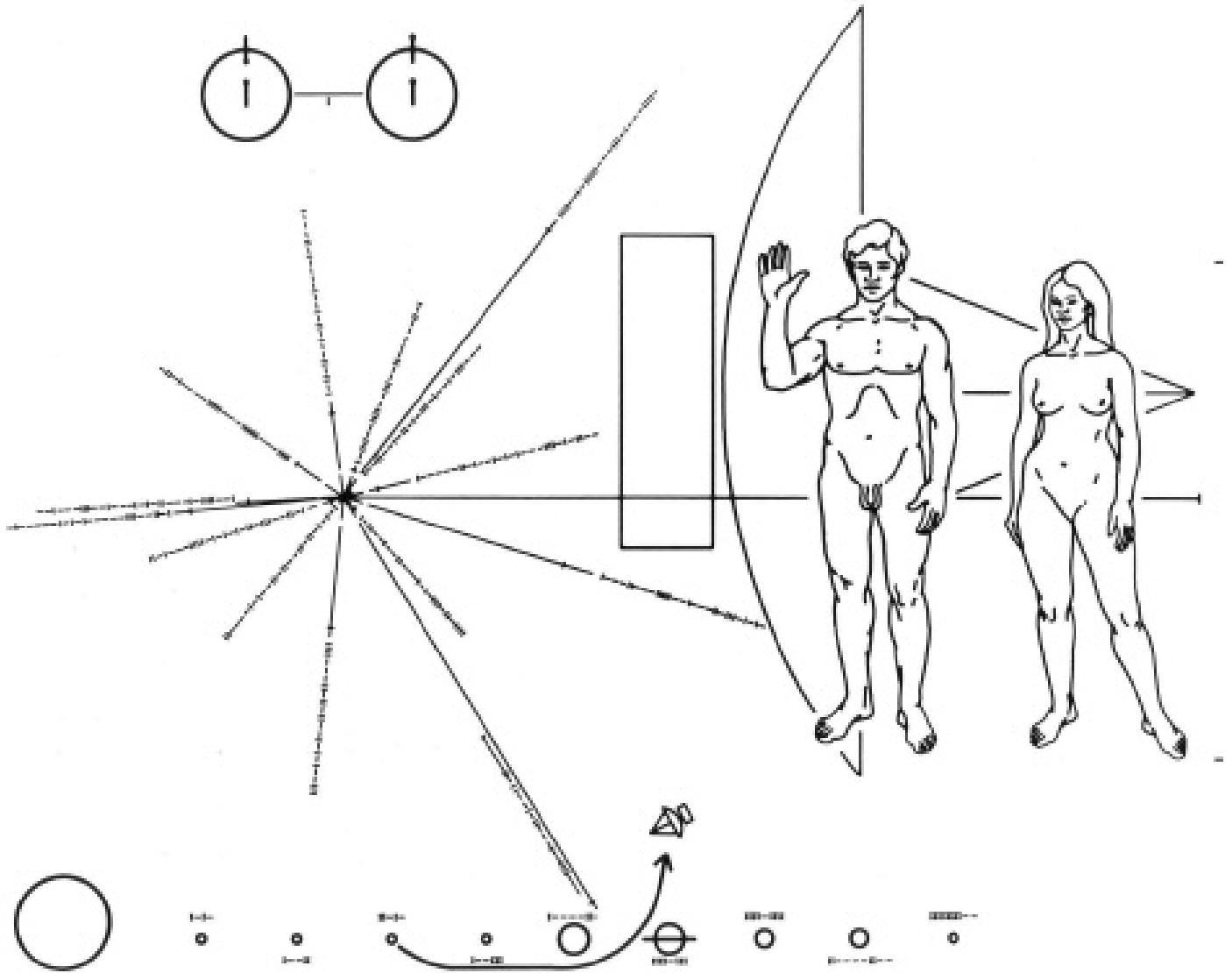


Figura 15. Mensaje grabado en placa de aluminio colocada en la nave espacial Pioneer 10, con información sobre la posición, época y naturaleza de los humanos en la galaxia.

LECTURAS SUGERIDAS

BARROW, J D, 2006, *Las constantes de la naturaleza*, Crítica, Barcelona.

DeDUVE, Ch, 2004, *La vida en evolución*, Crítica, Barcelona.

KOEBERL, C & MacLEOD, K G (eds.), 2002, 'Catastrophic events and mass extinctions: impacts and beyond', *Geological Society of America*, Special Paper 356.

SCHOPF, J W, 1999, *Cradle of Life*, Princeton University Press.

SOUTHWOOD, R, 2004, *La historia de la vida*, El Ateneo, Buenos Aires.



Datos del autor

Alberto C Riccardi

Doctor en Ciencias Naturales (orientación Geología),
Universidad Nacional de La Plata
Profesor titular (Paleontología Invertebrados), UNLP
Investigador Superior, CONICET
riccardi@museo.fcnym.unlp.edu.ar
www.fcnym.unlp.edu.ar