

En busca de los límites de la vida — Claves desde la Tierra

Susanna C. Manrubia

Centro de Astrobiología (INTA-CSIC)

Ctra. de Ajalvir km. 4, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid

Resumen

Hace cinco mil millones de años la Tierra que hoy habitamos era un ardiente e informe conglomerado de rocas fundidas, gas y polvo, parte menor del disco de materia que había de dar lugar a nuestro Sistema Solar. Quinientos millones de años más tarde, ya diferenciada del resto de planetas, la actividad volcánica era intensa y constante el bombardeo de su superficie por los fragmentos de materia remanentes. La Tierra era hostil, en consecuencia, a cualquier intento de organización química. Así fue, creemos, durante otros quinientos millones de años. Sin embargo, hoy debatimos acaloradamente la fecha en que las primeras células dejaron su huella fósil en las rocas más antiguas de la Tierra. Fue como poco 3500 millones de años atrás, quizá hace 3800. La conclusión es inmediata: una vez la temperatura descendió lo suficiente como para permitir que ciertas moléculas complejas fueran estables, la vida apareció y colonizó el planeta. Aparentemente, el paso de materia inerte a materia viva se produjo en unos pocos cientos de millones de años, en una forma o formas que aún no hemos descubierto ni imaginado. Ante tal hecho, podemos especular sobre lo azaroso o lo necesario de la organización de la materia para desembocar en la vida, sobre la precisa selección de constantes físicas en nuestro universo que así lo posibilitan, sobre la plausibilidad de mundos alternativos y sobre tantas otras cuestiones derivadas de nuestra curiosidad humana. Pero nuestras certezas son pocas. La mayor parte de las respuestas está por llegar, y el camino se antoja sumamente interesante.

1 Los orígenes

La actividad volcánica y la frecuencia de impactos disminuyeron progresivamente durante los primeros mil millones de años de existencia de la Tierra. A pesar de que estos eventos ocasionaban un calentamiento del planeta, también aportaron gran parte del agua y los componentes atmosféricos necesarios para la posterior aparición de la biosfera. En el primer tercio del eón Arcaico, hace unos 3800 millones de años (Ma), la atmósfera

de la Tierra era relativamente rica en CO₂, CO, vapor de agua y gases procedentes del vulcanismo, entre ellos metano, y suficientemente densa como para mantener un océano estable. El efecto invernadero propició un aumento de temperatura, necesario para mantener el agua líquida, a pesar de que el sol emitía un 30% de energía menos que en la actualidad. De esta época datan algunas de las rocas más antiguas conocidas (halladas en la isla de Akilia, Groenlandia) susceptibles de conservar restos de actividad biológica. Esta interpretación de las estructuras de aspecto celular que contienen no es compartida por todos los expertos en el tema. No queda duda, sin embargo, sobre los consorcios celulares (estromatolitos) de 3500 Ma de antigüedad hallados en Pilbara, Australia, sin duda de origen biológico. De la misma época datan los estromatolitos de Fort Victoria (Zimbawe) y los microfósiles de Warrawoona (Australia). Todo ello nos lleva a situar el origen de la vida en algún momento entre hace 3900 y 3500 Ma, entre el fin del bombardeo masivo de meteoritos y los primeros restos fósiles reconocidos.

Antes de ser transformada por la vida, la tierra era un fantástico laboratorio de química. Múltiples ambientes coexistían, la energía necesaria para propiciar reacciones químicas estaba disponible, no había consumo activo de moléculas complejas en ausencia de metabolismo; nubes, aguas someras, mares abiertos y cálidos fondos oceánicos proporcionaban crisoles distintos y quizá complementarios. Y en algunos de esos lugares, no podemos excluir que incluso en varios de ellos, finalmente sucedió. Las complejas transiciones en la organización de la materia que hicieron posible la aparición de la vida representan cambios cualitativos mayores que no comprendemos aún. Ni siquiera podríamos enumerar ordenadamente cómo deben producirse, ni pronunciarnos sobre su grado de contingencia o inevitabilidad.

En los más de cincuenta años transcurridos desde que el origen de la vida dejó el plano especulativo y pasó a ocupar los laboratorios de química, los avances logrados son modestos. Fue en 1953 cuando Stanley Miller, un estudiante de Harold Urey a la sazón en la Universidad de Chicago, llevó a cabo un hoy clásico experimento de síntesis abiótica. Asumiendo que la atmósfera primitiva de la Tierra era altamente reductora (más de lo que se acepta en la actualidad), Miller introdujo en un matraz vapor de agua, hidrógeno, metano y amoníaco, y sometió la mezcla a descargas eléctricas. Los resultados de su experimento no podían haber sido más alentadores: en pocos días se había generado una gran cantidad de compuestos de carbono, entre los cuales se pudo identificar muchos de los aminoácidos que forman parte de los seres vivos. Hoy en día conocemos varias formas de síntesis de los bloques químicos básicos necesarios para la vida a partir de compuestos inorgánicos. Se ha demostrado asimismo que es posible construir polímeros de hasta unas 40 unidades mediante la catálisis proporcionada por superficies minerales (en particular por la arcilla montmorillonita). Estas moléculas son pequeñas comparadas con las enzimas que habitualmente participan en la biología celular, pero

podrían haber presentado una funcionalidad suficiente para mediar en la transición hacia la autorreplicación, entre otras funciones esenciales. Otro punto de interés es la formación de membranas en su sentido más amplio, entendidas como frontera semipermeable entre un ambiente externo fluctuante y un interior donde se mantiene una densidad elevada de los reactivos implicados en las reacciones químicas, así como las condiciones que éstas requieren.

Podemos hablar de varias teorías sobre el origen de la vida, ninguna de ellas completa por el momento, que intentan enlazar el tiempo en el que los bloques químicos básicos para la vida estuvieron disponibles con la aparición de la primera protocélula. Estas teorías se dividen en dos grandes grupos: las que entienden que la aparición de genes es el paso fundamental (como la teoría del mundo de ARN, ya postulada por F. Crick y L. Orgel en la década de 1960, donde el ácido ribonucleico cumpliría funciones tanto de archivo de la información como de catálisis química) y las que requieren la aparición del metabolismo antes que la de los sistemas codificadores de información. Entre estas últimas encontramos el mundo de hierro y azufre de G. Wächtershäuser, la química compleja basada en tioésteres de Christian de Duve, o las aportaciones mucho más teóricas de F. Dyson y S. Kauffman, basadas en la capacidad autoorganizativa de grandes sistemas. Es probable que, si algún día conseguimos establecer una secuencia plausible de eventos conducentes a la aparición de la vida, el resultado sea una teoría híbrida donde parte de las enumeradas (y seguramente otras) colaboren en la síntesis.

2 Breve cronología de la vida

De una u otra forma, la evolución molecular desembocó en sistemas celulares en los que las macromoléculas principales (ácidos nucleicos y proteínas) realizaban funciones similares a las que llevan a cabo en los seres vivos actuales. Las primeras células eran procariotas, células sin núcleo que actualmente se clasifican en los dos dominios Bacteria y Arquea. La vida empezó con casi total seguridad en el agua líquida, quizá en una zona costera u otra región de aguas someras, o quizá en una región cálida del fondo oceánico. Hay indicios de que la vida puede haber tenido un origen termófilo o hipertermófilo, es decir, que las primeras células gustaban de ambientes notablemente cálidos. Aunque no hay consenso sobre esta posibilidad, se han hallado fósiles de organismos hipertermófilos de 3200 Ma de antigüedad, lo que certifica cuanto menos su aparición temprana. Recientemente se investiga los ricos ecosistemas y la variedad de reacciones químicas que pueden tener lugar en chimeneas submarinas y regiones hidrotermales en el fondo oceánico. En estas zonas se ha hallado gran cantidad de organismos adaptados a altas temperaturas. No obstante, en contra de tal “origen caliente” para la vida se argumenta la baja estabilidad de ciertas moléculas, como el propio ARN, que se degrada rápidamente a altas

temperaturas.

La vida celular se diversificó rápidamente y ocupó la mayor parte de nichos disponibles. Hay evidencias de organismos sulforreductores (capaces de extraer energía de compuestos de azufre, en particular sulfatos) hace 3500 Ma. Les siguieron los quimiolitótrofos y los metanógenos. Estos últimos establecieron asociaciones con microorganismos metanótrofos, los cuales usaban como fuente de energía el metano desprendido por los primeros. Hace unos 2700 Ma apareció la fotosíntesis oxigénica: fue el desencadenante de una serie de modificaciones mayores en la composición y el aspecto de la Tierra, en un proceso que se prolongó durante 1500 Ma. El oxígeno, presente en proporción cada vez mayor, se acumuló al principio en los océanos, donde oxidó el hierro originando así las grandes formaciones de hierro bandeado. Cuando el oxígeno pasó a la atmósfera en cantidades apreciables causó extinciones debido a su toxicidad. La biosfera reaccionó ante el brutal cambio: aparecieron organismos capaces de usar el oxígeno como aceptor final de electrones en la respiración y se hicieron progresivamente más abundantes en el planeta. La nueva forma de respiración basada en oxígeno tenía ventajas, ya que proporcionaba energía en cantidades no disponibles hasta entonces. Las antiguas comunidades anaerobias se retiraron paulatinamente a ambientes donde no alcanzaba el oxígeno y los organismos aerobios se expandieron, transformaron el planeta, dotaron a los océanos de grandes cantidades de oxígeno en disolución y condujeron a la atmósfera actual. El mar perdió su arcaico color pardo turbio y la atmósfera se volvió transparente. Y es sólo desde entonces que este mundo tiene el cielo azul.

Durante unos mil millones de años, las células procariotas fueron los únicos habitantes del planeta. La aparición de la célula eucariota supuso una revolución en la historia de la vida, abriendo posibilidades creativas hasta entonces imposibles. Su estructura es más sofisticada que la de la célula procariota, ya que posee un complejo sistema de membranas internas, incluyendo la membrana nuclear que aísla el genoma del citoplasma celular, y un citoesqueleto: a falta de una pared celular rígida como existe en casi todos los procariotas, el citoesqueleto mantiene la forma celular y posibilita distintas funciones motiles. En casi todas las células eucariotas hallamos unos orgánulos (mitocondrias) donde tiene lugar la respiración de oxígeno. Son las verdaderas factorías energéticas de la célula, y provienen de la asociación (endo-) simbiótica entre los primeros eucariotas y determinados procariotas de vida libre: una especie de bacterias púrpura no sulfurosas. Algunos eucariotas (las plantas y las algas) poseen otro orgánulo importante, el cloroplasto, adquirido por endosimbiosis con antiguas cianobacterias. Existe evidencia indirecta de la presencia de células eucariotas hace 2650 Ma, aunque los primeros fósiles no controvertidos datan de hace unos 2100 Ma. La complejidad estructural de estas nuevas células, las posibilidades evolutivas ofrecidas por un genoma separado del citoplasma y la enorme cantidad de energía proporcionada por los orgánulos respiratorios y fotosintéticos adquiridos inauguró

una nueva era en evolución: la multicelularidad.

Una vez la célula eucariota estuvo disponible, la aparición de organismos multicelulares parece ser un suceso necesario. De hecho, hongos, plantas y animales evolucionaron independientemente a partir de linajes unicelulares: los hongos provienen de los quítridos, las plantas de las algas verdes, y los animales de los coanoflagelados. Las algas rojas, verdes y pardas se incluyen ocasionalmente entre los organismos multicelulares, atendiendo a su capacidad de formar grandes colonias que incluyen diferentes tipos celulares. También algunos procariotas se organizan en colonias que comparten ciertas propiedades con los organismos multicelulares verdaderos, aunque su complejidad es mucho menor.

Es muy difícil hallar rastros de organismos pequeños y de cuerpo blando, y de ahí que exista un aparente salto entre las colonias de organismos unicelulares y la aparición de los animales. Los fósiles más antiguos de animales tienen 590 Ma de antigüedad, aunque es muy probable que sus precursores aparecieran mucho antes, quizá 1000 Ma atrás. Resulta fascinante la explosión creativa que se dio tras la aparición de los animales. En el Cámbrico, una era que empezó hace 542 Ma, los mares se poblaron de las criaturas más fantásticas imaginables. En un intervalo de tiempo brevísimo desde un punto de vista geológico y evolutivo aparecieron todos los planes corporales que hoy permanecen (incluyendo a los cordados, entre los que nos contamos), y otros muchos que se extinguieron. A partir de entonces, y en comparación con la dificultad que seguramente entrañó construir la primera molécula con capacidad de autorreplicarse, el trabajo de la evolución ha sido, en cierta medida, sencillo.

3 Clasificación de la vida

Hasta muy recientemente, la clasificación de los organismos vivos se basaba en su fenotipo, es decir, en sus características observables (morfología, comportamiento, adaptaciones ...). La taxonomía clásica establecía jerarquías e incluía tanto las especies vivas como las extinguidas, cuyos caracteres se conocían a partir de los restos fósiles. Actualmente, las técnicas de secuenciación de genomas han permitido realizar una clasificación más objetiva (y menos intuitiva) basada en la comparación sistemática de diversos genes y en particular de los que originan el ribosoma celular. Así ha sido como la clasificación en cinco reinos de hace apenas una década (monera, protoctista, hongos, plantas y animales) han sido casi completamente sustituidos por tres dominios, según propuesta de C. Woese en 1990: Arquea, Bacteria y Eucaria. Cuatro de los reinos (todos excepto monera) se agrupan ahora en Eucaria. Los estudios con secuencias provenientes del ARN ribosomal (con frecuencia el gen de la molécula 16S) revelan que la distancia evolutiva entre tres de ellos es notablemente menor de lo que sus diferencias morfológicas parecen indicar: hongos, plantas y animales pertenecen al dominio Eucaria, y se hallan evolutivamente

próximos a pesar de haberse originado partiendo de tres linajes independientes de eucariotas unicelulares. Hay algunos investigadores, entre ellos L. Margulis, que mantienen sin embargo que la clasificación basada en un pequeño segmento de ARN olvida la mayor parte de la historia evolutiva de los organismos, en la cual grandes eventos como la simbiosis han sido determinantes. Siendo rigurosos, un árbol de la vida basado en un fragmento de ARN o en un solo gen es en realidad el árbol de ese fragmento o de ese gen, no de los organismos que actualmente lo tienen incorporado en su genoma. Sabemos que los genomas han mantenido un alto grado de promiscuidad durante la evolución: fragmentos enteros han sido traspasados horizontalmente entre especies, módulos enteros del genoma en ocasiones, en un proceso que aún hoy en día ocurre pero que fue con gran probabilidad común (incluso imprescindible) al principio de la evolución. Si se toma en consideración las cesiones horizontales de partes del genoma no se habla ya de un árbol de la vida, sino de una red de la vida.

No obstante las críticas que se puedan realizar a los estudios moleculares, el descubrimiento más notable derivado de la aplicación de estas técnicas ha sido sin duda la identificación de un nuevo dominio: Arquea. Todos los organismos pertenecientes a este dominio son procariotas y, en la clasificación en reinos, Arquea venía agrupado con el dominio Bacteria en atención a sus características celulares. Pero Bacteria y Arquea no podrían haber tenido historias evolutivas más distintas. Sus paredes celulares son distintas en composición. Mientras que casi todas las bacterias tienen peptidoglicano, el dominio Arquea presenta varios tipos distintos: pseudo-peptidoglicano, polisacáridos, proteínas y glicoproteínas pueden formar la envoltura de las arqueas. Hay asimismo otras diferencias en la química más básica de la producción de proteínas y de la arquitectura celular. En cuanto a sus hábitats, todos los procariotas patógenos pertenecen al dominio Bacteria, lo cual implica que al menos algunos de los grupos bacterianos han coevolucionado de forma suficientemente cercana al hospedador que infectan o parasitan. Muchos procariotas del dominio Arquea también ciertas bacterias son extremófilos, es decir, ocupan ambientes que tradicionalmente habían sido clasificados como inhabitables por sus duras condiciones (alta temperatura, presencia de sustancias tóxicas, gran acidez...). El repertorio de soluciones metabólicas que hallamos en las arqueas es excepcional. Las células eucariotas, por su parte, comparten semejanzas con ambos dominios procariotas. Por ejemplo, mientras que la arquitectura metabólica resulta más próxima a la del dominio Arquea, gran parte de las enzimas eucariotas tienen su origen en el dominio Bacteria. Resulta aún difícil establecer de cuál de los dos se halla evolutivamente más cercano.

Sea cual sea la secuencia precisa de eventos evolutivos que llevan de la protocélula inicial a la diversidad que hoy encontramos, todos los seres vivos procedemos de un único antepasado común, lo cual queda definitivamente demostrado por la filogenia molecular basada en la comparación de genes. A este progenote, hipotético organismo unicelular

que habitó la Tierra hace al menos 3.500 Ma, se le designa con el acrónimo de LUCA (*Last Universal Common Ancestor*). De todo árbol de la vida quedan excluidos virus y viroides: estos organismos de origen incierto evolucionan tan rápidamente que imposibilitan el establecimiento de una semejanza razonable no sólo con los organismos celulares, sino entre ellos mismos.

La biología molecular ha destapado la caja de Pandora de la biodiversidad. La mayor parte de las especies de Arquea y Bacteria no pueden ser cultivadas en el laboratorio. Sus ambientes naturales son difíciles de recrear, y por tanto no se conoce con precisión la microbiología de gran número de especies. Sin embargo, la toma directa de muestras en el medio natural y el análisis de los genomas mediante sondas moleculares específicas para cada dominio permiten decir que son muchas las especies distintas de las conocidas que están ahí, aunque no sepamos qué aspecto tienen. Las estimas de biodiversidad se han visto pues fuertemente corregidas. Norman Pace afirma que la microbiología clásica sólo pudo describir una de cada 10.000, quizá sólo de cada 100.000 especies de arquea y bacteria que existen. Y aunque, de las especies descritas, un 74% son animales, creemos ahora que éstas sólo representan el 6% de todas las especies que existen. El mundo microbiano nos es desconocido en su mayor parte.

4 Colonización de ambientes extremos

La característica más relevante de las arqueas reside en su capacidad de adaptación a ambientes que, desde nuestra antropocéntrica visión, identificaríamos como claramente hostiles a la vida: la mayoría de las arqueas que conocemos son organismos extremófilos. Esto quiere decir que son capaces de colonizar ambientes con alguna característica física o química que consideraríamos extrema (por oposición a ambientes mesófilos, que son aquéllos en los que un ser humano se siente cómodo). Los organismos extremófilos (arqueas en su mayor parte, pero también algunas especies de bacteria y eucaria) han superado la dificultad desarrollando adaptaciones que les permiten crecer y replicarse en ese ambiente. La clasificación sistemática de los organismos extremófilos fue inaugurada en la década de 1960 por Thomas D. Brock y su grupo, quienes describieron los primeros organismos hipertermófilos en el parque natural de Yellowstone (EEUU). Una de las primeras especies descritas fue *Thermus aquaticus*, una bacteria resistente a altas temperaturas cuya polimerasa (la proteína que sintetiza ADN), la conocida como Taq-polimerasa, se ha convertido en una importante herramienta biotecnológica.

Los avances en el conocimiento de organismos extremófilos han sido enormes desde entonces. Fue la simple aceptación de que quizá había algún organismo capaz de soportar la alta presión de las fosas oceánicas, el frío permanente de los desiertos de hielo o la sequía de las zonas más áridas de la tierra la que proporcionó una nueva forma de mirar a nuestro

entorno. Y sólo así se pudo ver la riqueza del dominio Arquea, en un descubrimiento continuo que ha obligado a replantear cuáles son los requerimientos ambientales mínimos que la vida precisa. Tomando el único ejemplo de vida que conocemos, la de la Tierra, resultan imprescindibles tan sólo tres condiciones: agua líquida, nutrientes y una fuente de energía. Efectivamente, hemos hallado vida allí donde la hemos buscado, siempre y cuando hayamos sido capaces de diseñar los protocolos necesarios para identificarla o aislarla. No haber hallado vida en algunos ambientes no significa que ésta no haya conseguido adaptarse a ellos. Como el tardío descubrimiento del dominio Arquea indica, quizá no somos aún suficientemente hábiles buscando. O quizá sucede que no sabemos qué buscar . . .

Recorramos con algo de detalle algunos de los ambientes donde, inesperadamente, hemos descubierto que la vida se desarrolla. Si bien siguen existiendo limitaciones a las temperaturas máximas y mínimas que permiten el correcto funcionamiento del metabolismo, los límites actuales sitúan en unos 20 grados centígrados bajo cero el mínimo y en 113°C el máximo. Así, hay organismos psicrófilos capaces de medrar en minúsculos granos de polvo atrapados en el hielo, alrededor de los cuales una pequeña parte del agua puede estar en fase líquida. Algunos termófilos habitan las proximidades de chimeneas submarinas, zonas donde el calor del interior de la tierra y la alta presión debida a la profundidad mantienen el agua líquida por encima de los 100°C. Y, ya en superficie, otros muchos colorean zonas de aguas termales, donde al lodo en ebullición se unen gases tóxicos para los humanos (como compuestos de azufre) que sin embargo resultan ser una fuente de energía para los organismos que allí se desarrollan. Por su parte, los microorganismos halófilos son capaces de soportar concentraciones elevadísimas de sales en el agua. En ocasiones resisten también condiciones de desecación y, por tanto, son organismos abundantes en desiertos como Death Valley en California o el de Atacama en Chile.

Quizá entre los ambientes más sorprendentes donde la vida florece se hallen los ríos ácidos. Uno de sus ejemplos más notables es el río Tinto, en la provincia de Huelva (España), que debe su nombre al color de sus aguas. El pH se mantiene entre valores 2 y 3 a lo largo de todo el curso del río. Como comparación, baste decir que su acidez es semejante a la del vinagre (pH=3) o a la del zumo de limón (pH=2). Esta gran acidez posibilita además que muchos metales pesados (particularmente el hierro) se hallen disueltos en el agua. A pesar de la toxicidad que ello implica, el río Tinto cobija una enorme diversidad de organismos, fundamentalmente en el dominio Bacteria, pero también en Arquea y Eucaria. En el otro extremo de la escala de pH descubrimos que la vida también se ha adaptado a lagos alcalinos, con pH en torno a 10, lo cual hace que sus aguas sean comparables a disoluciones jabonosas.

Ni siquiera altas dosis de radiación, que sabemos puede ser un potente mutágeno y por tanto letal para la mayor parte de los organismos, representan un ambiente suficien-

temente adverso. El paradigma de microorganismo resistente a radiación es *Deinococcus radiodurans*, muy común en ambientes orgánicos, pero capaz de resistir dosis de radiación miles de veces superior a la letal para un ser humano. Incluso el interior de las rocas resulta ser un nicho deseable para algunos organismos quimiolitótrofos que obtienen la energía necesaria de los mismos minerales. Actualmente hay diversos proyectos en curso que están perforando el subsuelo con objeto de establecer la presencia de microorganismos a gran profundidad y determinar sus características. Podemos ya aseverar que existe una biosfera cálida y profunda, con una biomasa total superior a la de todas las plantas y animales que pueblan la superficie terrestre.

5 Otros mundos, otros hábitats

Las altas dosis de radiación, una gravedad inferior a la terrestre y las bajas temperaturas son las tres condiciones físicas que más caracterizan los hábitats que hallamos en otros planetas y satélites del sistema solar. Por el momento no tiene mucho sentido plantear la vida en planetas extrasolares, ya que si el conocimiento de nuestro Sistema Solar es escaso, se convierte en nulo o casi nulo cuando nos referimos a planetas que orbitan alrededor de otras estrellas. Concentrémonos pues en nuestros vecinos.

La radiación ultravioleta es una fuente de estrés para los organismos, dado que puede causar la descomposición de las moléculas orgánicas por ser altamente energética e introducir mutaciones difícilmente reparables en los genomas. El espacio exterior está sometido a fuertes dosis de radiación, y esa es una de las dificultades que entraña el transporte viable de organismos o moléculas complejas usando meteoritos como vehículo. También la superficie de muchos planetas, debido a la falta de una atmósfera suficientemente protectora, resulta letal si los organismos quedan directamente expuestos a la radiación que alcanza la superficie. Actualmente la Tierra cuenta con la protección de la capa de ozono, pero no siempre fue así. Se cree que los niveles de radiación que alcanzan la superficie de Marte en la actualidad son comparables a los existentes en la Tierra durante el eón Arcaico, en el periodo en que pensamos que se originó la vida. Existen múltiples formas de protegerse contra el efecto nocivo de la radiación. La redundancia natural de las moléculas en la célula es una de ellas; los sistemas de reparación de algunos organismos (como *Deinococcus*) es otra. Ciertos ambientes proporcionan protección física, como una columna de agua sobre los organismos, una capa de polvo o el abrigo de una roca. Aunque un exceso de radiación puede ser letal para algunas especies, otras pueden conseguir sobrevivir gracias a su capacidad para adaptarse a ambientes aislados físicamente de la radiación. Si pensamos en hábitats extraterrestres, sería más factible hallar vida a unos centímetros de profundidad en el suelo que directamente expuesta en superficie.

La presencia de un campo gravitatorio actúa en muchas ocasiones como referencia

para orientar el crecimiento y el movimiento de los organismos. En animales y plantas influye en la diferenciación y en la fisiología celular. Puesto que no es posible modificar la gravedad en la superficie de la Tierra para estudiar sus efectos en el desarrollo de los organismos, la investigación de los efectos de la microgravedad deben llevarse a cabo en misiones espaciales. Un incremento en la gravedad se puede obtener en situaciones de aceleración, por ejemplo mediante centrifugación. Otros experimentos sobre motilidad y dirección de crecimiento pueden realizarse simplemente rotando el sistema de estudio. No sabemos aún mucho sobre los efectos de la microgravedad, si bien los resultados conocidos hasta el momento indican que cambios incluso notables en la constante gravitatoria no son limitantes para el correcto desarrollo de microorganismos. Se cree que la situación puede ser distinta con las plantas, debido a la influencia de la gravedad en la diferenciación de raíces y tallos, y a su correlación con la dirección en que llega la luz. Finalmente, los mecanismos celulares mediante los que se percibe la gravedad y se traduce a cambios químicos no son aún bien conocidos y se sigue investigando en su origen y función.

Entre gravedad, radiación y temperatura, este último es el factor más limitante para el correcto funcionamiento de la célula. Las bajas temperaturas son típicas en el sistema solar. Con la excepción de Mercurio y Venus, la superficie de todos los planetas y sus satélites mantienen zonas con temperaturas bajo cero durante el año completo o gran parte de él. Algunos son además ricos en agua, con lo cual las adaptaciones a bajas temperaturas que observamos en la Tierra podrían darnos indicaciones sobre las variantes metabólicas y estructurales necesarias para que un organismo sobreviva en determinadas regiones de otros planetas. Dos ejemplos cercanos y de gran interés en la actualidad son Europa y Marte.

Europa, junto con Io, Ganímedes y Calixto, es uno de los cuatro satélites de Júpiter que Galileo descubrió. Sabemos que Europa está totalmente cubierto de hielo de agua. Su superficie fragmentada y rugosa, donde los cráteres de impacto son relativamente raros, revela que Europa es un satélite dinámico. Se sospecha que bajo la helada superficie puede haber un océano que cubra todo el planeta antes de llegar a su litosfera, primero, y a su núcleo metálico, después. Es ese caso, si Europa fuera una inmensa esfera líquida y protegida por el hielo superficial, no podríamos descartar que su océano albergara vida. La superficie helada está hollada por enormes grietas de colores rojizos y pardos que contrastan con el hielo azulado. Una de las posibilidades que actualmente se debaten es si ese color delata en realidad una composición rica en compuestos de carbono presentes en ese hipotético océano, los cuales llegarían a la superficie abriéndose paso a través de las grietas en el hielo. Por su relativa cercanía a la Tierra y por su tamaño, Europa está ahora mismo en el punto de mira de la investigación espacial.

Marte ha fascinado al hombre desde hace siglos. Este planeta, semejante en muchos aspectos a la Tierra, nunca ha dejado de sorprendernos. La topografía de Marte sugiere

que hace miles de millones de años, cuando parece que su atmósfera era más densa y el clima más cálido, el planeta pudo estar parcialmente cubierto por un gran océano en su hemisferio norte. Actualmente Marte tiene una atmósfera tenue, compuesta en su mayor parte por dióxido de carbono. Su morfología es espectacular: con la mitad del radio de la Tierra y menos de un tercio de su superficie, hallamos en Marte la montaña más alta de sistema solar (*Olympus Mons*, de 28 km de altura) y el cañón más profundo y extenso (*Valles Marineris*, en uno de cuyos brazos cabría holgadamente el Gran Cañón del Colorado). La alternancia de las estaciones sume a cada uno de los hemisferios en períodos de oscuridad que se prolongan por medio año marciano, o un año terrestre, aproximadamente. Cuando la luz del sol no alcanza la superficie, ésta se halla usualmente cubierta por hielo de CO₂, lo que significa que la temperatura en ese lugar es inferior a 128°C. Sin embargo, con la llegada de la primavera en uno u otro hemisferio la temperatura aumenta, el dióxido de carbono pasa a fase gas y una gran cantidad de hielo de agua en forma de permafrost (similar al que encontramos en los suelos de Liberia o Alaska) queda parcialmente expuesto en superficie. Los modelos detallados del clima marciano predicen que, en los períodos más cálidos del año, la temperatura en algunos lugares supera los 0°C. Medidas directas tomadas con el instrumento THEMIS (*Thermal Emission Imaging System*) a bordo de la nave *Mars Odyssey* revelan que, incluso a latitudes muy altas, la temperatura es suficientemente elevada como para permitir la presencia de agua líquida por breves períodos. (Recordemos que, dada la baja presión atmosférica de Marte, el agua líquida es inestable y pasa a vapor de agua en unos días). En estas condiciones, no sería imposible que algunos organismos pudieran sobrevivir en tales microclimas, alternando un estado de crecimiento y reproducción durante los períodos de bonanza con un estado aletargado, inactivo, el resto del año.

Como Europa y Marte demuestran, es plausible que incluso algunos extremófilos terrestres pudieran sobrevivir en microambientes presentes hoy en día en cuerpos del Sistema Solar sin necesidad, incluso, de ulteriores adaptaciones. La vida es resistente, plástica e imparable: la simple supervivencia de una especie conlleva la generación de variantes que, poca duda cabe, serían capaces de colonizar ambientes aledaños. Solamente debemos darle tiempo. Los límites a la adaptación los pone únicamente nuestra incapacidad de imaginar soluciones creativas, eso mismo que la evolución ha hecho de forma tan eficiente desde que la vida es vida.

6 Epílogo

El siglo XIX nos dejó como herencia cultural el descubrimiento del tiempo profundo. Sólo una vez adquirida la conciencia de que los procesos geológicos actuales son los mismos que han dado forma al paisaje que observamos se pudo empezar a imaginar un mecanismo

constructivo semejante en la evolución de la vida. El cambio de paradigma (de una biosfera inamovible a una evolución creativa) inauguró un siglo XX en el que los avances en el conocimiento de las bases genéticas de la evolución han permitido una clasificación de los organismos actuales sin precedentes, y nos ha sorprendido con las inesperadas semejanzas entre las especies aparentemente más dispares. La existencia de un ancestro común a todos los seres vivos celulares resulta un corolario irrefutable de estos avances.

Entramos en el siglo XXI con más preguntas que respuestas. Respecto de los orígenes de la vida, nos queda por dilucidar la base de la autoorganización química, que suponemos anterior a cualquier forma de metabolismo, y el gran paso de moléculas más o menos complejas a una, la primera, capaz de contener información conducente a su replicación. En un camino que imaginamos suave (al menos desde un punto de vista lógico) desconocemos cómo seleccionar moléculas quirales de forma eficiente, cuál es el genoma mínimo necesario para mantener una célula y, por supuesto, cómo los bloques químicos esenciales, los que ya identificó Miller en sus lúcidos experimentos, construyen el suntuoso edificio celular. Los problemas que plantea la adaptación a distintos ambientes y los mecanismos moleculares implicados no son menores. A pesar de tener a nuestra disposición refinadas técnicas que nos proporcionan la secuencia del genoma de cualquier especie que nos interese, esa información no nos revela cómo se construye un organismo, cuáles son los programas que posibilitan su desarrollo, ni qué habilidades posee para sobrevivir si su ambiente se torna hostil. La forma en que se genera un ecosistema robusto y se produce la coevolución de las especies en el mismo es otra cuestión con muchos aspectos por dilucidar.

Sin un conocimiento profundo de la plasticidad inherente a un genoma poco podemos decir sobre los límites de la adaptación y, por ende, sobre los límites que el ambiente impone a la propagación de la vida. Imaginar la existencia de formas de vida alternativas a la que conocemos, simplemente con distinta quiralidad o con una bioquímica diferente, representa un reto formidable. Poco a poco estamos superando las dificultades que entraña identificar organismos adaptados a ambientes extremos y las formas en que sus metabolismos lo hacen posible. Pero aún queda por averiguar si, una vez lleguemos a otros mundos, enfrentados no ya a lo desconocido, sino a lo no imaginado, seremos capaces de reconocer la vida en el caso (¿probable?) de que no comparta árbol genealógico con nosotros.

Ambiente	Nombre genérico de la adaptación	Organismo ejemplo	Rango o extremos de resistencia	Hábitats donde se ha localizado
Altas temperaturas	Termófilos	<i>Pyrolobus fumarii</i> (A)	113° C (hasta 120° C en el laboratorio)	Paredes de fumarolas hidrotermales submarinas
Bajas temperaturas	Psicrófilos	<i>Polaromonas vacuolata</i> (B)	Óptimo alrededor de 5° C (hasta – 20°C para la cepa JS666 de <i>Polaromonas</i>)	Fase líquida de agua marina; Antártida
Alto pH	Alcalófilos	<i>Natronobacterium gregory</i> (B)	10 (hasta 12)	Lagos alcalinos (Kenya)
Bajo pH	Acidófilos	<i>Picrophilus oshimae</i> (A)	0,7	Solfataras (norte de Japón)
Alta presión	Barófilos	MT41 (B)	700 atm (hasta más de 1000 atm)	Fosa de las Marianas, a 10.500m de profundidad
Alta concentración de sal	Halófilos	<i>Halobacterium salinarium</i> (B)	25% de sal en disolución (hasta 32%, saturación)	Común en salinas; los pigmentos proporcionan un color rosado característico
Desecación	Xerófilos	<i>Xeromyces bisporus</i> (E)	0,65 ¹	Común en productos de panadería, fruta confitada
Radiación	Resistentes a radiación	<i>Deinococcus radiodurans</i> (B)	10.000-20.000 Gy ²	Ampliamente distribuido en suelos y ambientes orgánicos (por ejemplo carne envasada); agua de refrigeración de reactores nucleares

Figura 1.— Algunos ambientes extremos y organismos adaptados a ellos. La letra entre paréntesis tras el nombre del organismo ejemplo especifica si pertenece al dominio arquea (A), bacteria (B) o eucaria (E). ¹ Este valor corresponde al llamado coeficiente de disponibilidad de agua. El agua pura tiene un coeficiente 1, mientras que los cereales de desayuno (secos y con gran propensión a hidratarse) tienen un coeficiente alrededor de 0,7. *Xeromyces* (un hongo) sobrevive en una disolución con un 65 % de glicerol. ² El Gray es la unidad de radiación. Un Gray Corresponde a un Joule de energía radiativa por kilogramo de masa. Una dosis de 5-10 Gy es letal para un ser humano.

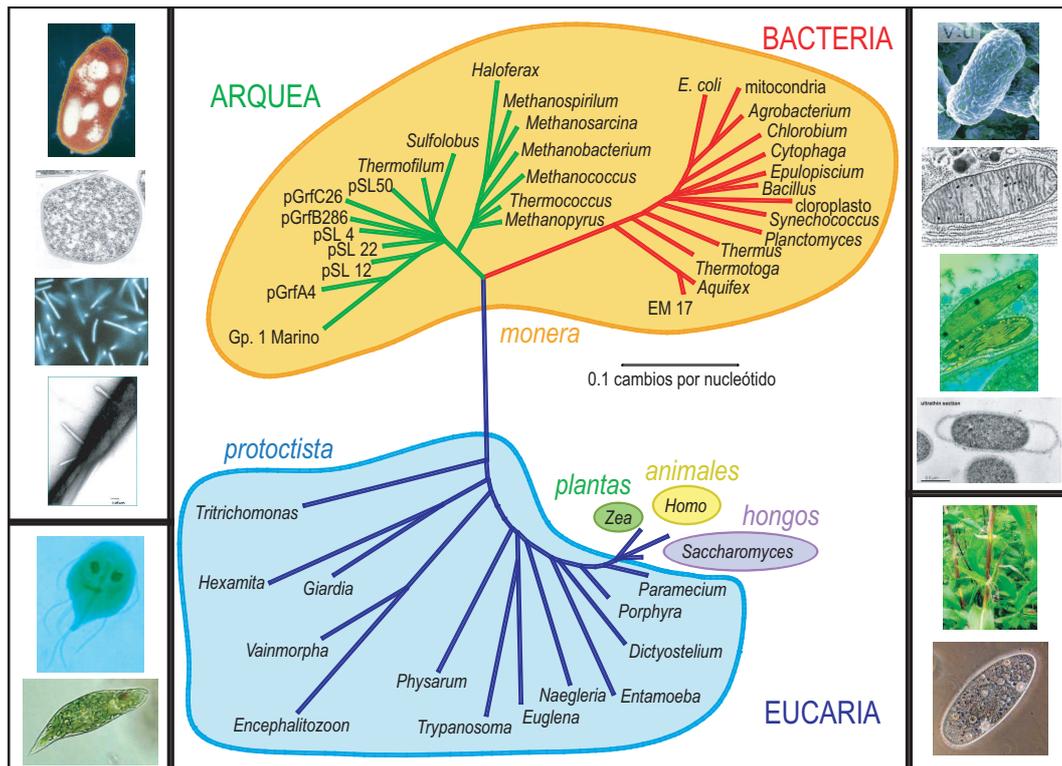


Figura 2.— Clasificación de la vida. Los organismos actuales se dividen en tres dominios: Arquea (ramas en verde), Bacteria (en rojo) y Eucaria (en azul oscuro). Dentro de Arquea hallamos una gran proporción de microorganismos adaptados a ambientes extremos. Algunos sólo se conocen por las secuencias de sus genes ribosomales, obtenidas directamente del ambiente que habitan, como pSL12 o pGrfB286. Obsérvese la posición que cloroplastos y mitocondrias ocupan en el dominio Bacteria. Dentro del dominio Eucaria, algunos eucariotas que ramificaron tempranamente (como *Trichomonas*, *Giardia* o *Encephalitozoon*) no tienen mitocondrias. Los dominios en color indican la clasificación en cinco reinos: monera (todos los organismos procariontes), protoctista (eucariotas unicelulares), hongos (representados por la levadura *Saccharomyces*), plantas (género *Zea*, correspondiente al maíz) y animales (género *Homo*), estos tres últimos claramente agrupados en uno de los extremos del dominio Eucaria. Las imágenes laterales ilustran algunos de los organismos que aparecen en el árbol filogenético que se muestra. A la izquierda, y de arriba a abajo, representamos *Haloferax*, *Sulfolobus*, *Methanopyrus* y *Thermofilum* pertenecientes al dominio Arquea, y *Giardia* y *Euglena* del dominio Eucaria. A la derecha, de arriba a abajo, vemos una célula de *Escherichia coli*, una mitocondria, un cloroplasto y una célula de *Thermotoga* (dominio Bacteria) y una imagen de *Zea* y *Paramecium*, del dominio Eucaria.

Agradecimientos

Este texto ha mejorado gracias a las sugerencias y comentarios de mis amigos y colaboradores Jacobo Aguirre, Carlos Briones, David Fernández-Remolar, Ester Lázaro, Chema Ruiz y Michael Stich.

Referencias

- [1] P. Davies, *The 5th miracle – The search for the origin and meaning of life*. Touchstone, Simon & Schuster, New York, 1999.
- [2] A. Delsemme, *Our cosmic origins*. Cambridge University Press, 1998.
- [3] C. de Duve, *Vital dust – The origin and evolution of life on Earth*. BasicBooks, New York, 1995.
- [4] F. Dyson, *Origins of life*. Cambridge University Press, 1999.
- [5] R. Fortey, *Life – A natural history of the first four billions of life on Earth*. First Vintage Books Editions, New York, 1997.
- [6] S. J. Gould, *The structure of evolutionary theory*. The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, 2002.
- [7] G. Horneck and C. Baumstark-Khan (eds.), *Astrobiology – The quest for the conditions of life*. Springer-Verlag, 2002.
- [8] S. Kauffman, *At home in the universe*. Oxford University Press, New York, 1995.
- [9] M. T. Madigan, J. M. Martinko, and J. Parker (eds.), *Brock biology of microorganisms*, 10th ed. Prentice Hall, New Jersey, 2003.
- [10] L. Margulis, *Planeta simbiótico – Un nuevo punto de vista sobre la evolución*. Debate, Madrid, 2002.
- [11] J. Maynard Smith and E. Szathmáry, *The major transitions in evolution*. Oxford University Press, New York, 1997.
- [12] C. Wills and J. Bada, *The spark of life – Darwin and the primeval soup*. Perseus Publishing, Cambridge (Massachusetts), 2000.

