

Astrobiología: En busca de los límites de la vida

Susanna C. Manrubia, *investigadora del Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)*

Hace apenas doscientos años que somos conscientes de la inmensidad del tiempo geológico, de los 4.500 millones de años recorridos por la Tierra desde su incandescente principio hasta el azul actual. Y solamente a finales del siglo XX empezamos a asimilar la vastedad del espacio y sus límites. Tiempo profundo y espacio profundo son los dos ingredientes básicos que han hecho posible la aparición de vida en nuestro universo. El Big Bang, la explosión primordial que marca la diferencia entre el ser y el no ser del espacio-tiempo, ocurrió hace unos 13.700 millones de años. La vida unicelular habita la Tierra desde hace al menos 3.500 millones de años, ocupando hoy en día cualquier ambiente donde agua, una fuente de energía y nutrientes estén presentes. Homo sapiens es uno de los productos más recientes de la evolución, y la única especie que se preocupa por sus orígenes. Tanto tiempo como espacio son inabarcables a efectos prácticos: sólo recientemente hemos averiguado, de forma aún aproximada, cuándo tuvieron lugar los mayores hitos en la evolución del universo y la vida. Todavía nos queda mucho camino por recorrer para descubrir cómo.

En tan sólo tres minutos tras el Big Bang se formaron los núcleos de los elementos químicos más ligeros: hidrógeno, helio y litio. La temperatura fue suficientemente baja para permitir la formación de átomos unos 300.000 años más tarde, cuando los electrones, libres hasta entonces, se unieron a los núcleos atómicos. Así se inició el camino hacia la formación de estrellas y galaxias. La materia se enfriaba lentamente y se organizaba; las estrellas generaban en su interior elementos más pesados que se redistribuían al final de su ciclo vital; las

nubes de polvo y gas, algunas de composición química ya compleja, se condensaban en nuevas estrellas y, ocasionalmente, formaban sistemas planetarios a su alrededor. Hubieron de transcurrir unos 9.000 millones de años desde el Big Bang para que el Sistema Solar, aún en una forma poco parecida a la que hoy observamos, apareciese.

La Tierra se formó hace aproximadamente 4.500 millones de años. Al principio su interior y su superficie estaban muy calientes, tanto como para mantener fundidas las rocas y provocar que muchos elementos volátiles (entre ellos el agua) escapasen fácilmente. El Sistema Solar era un lugar inestable y enormes meteoritos colisionaban a menudo con los planetas en formación. Uno de esos grandes bólidos arrancó una parte de nuestro planeta en el brutal impacto que originó su único satélite: la Luna. No obstante, la Tierra se enfrió de forma continuada lo suficiente como para consentir que esos mismos meteoritos aportaran más adelante parte del agua que había escapado en épocas anteriores. Paulatinamente se crearon micro ambientes más estables, en los que se sucedieron reacciones químicas complejas. Aún desconocemos la mayor parte de los eventos que ocurrieron en la transición de la materia inorgánica a la orgánica, pero sabemos que fue relativamente rápida. En unos pocos cientos de millones de años tras el fin del bombardeo de meteoritos la vida había tomado la Tierra.

¿Fue ésta una circunstancia singular? ¿Fue una conjunción de sucesos improbables la que dio lugar a la vida? ¿Es realmente la vida un hecho único, azaroso, raro, o se deriva necesariamente de las leyes físicas? ¿Cuántos casos como el de la Tierra hay en el Universo? Todas estas preguntas pertenecen al ámbito de la Astrobiología, y son estudiadas mediante la concurrencia de distintas disciplinas científicas. La astrofísica, la geología, la física, la química y la biología, así como las tecnologías que en el siglo XXI permiten la exploración de otros mundos, se unen para intentar darles respuesta.

Primeros indicios de vida

Las primeras indicaciones de la posible presencia de vida en nuestro planeta se remontan a unos 3.800 millones de años. En rocas de esa



Cronología de algunos hitos relevantes en la historia de la Tierra y la vida.

Los cinco eones transcurridos desde la formación de la Tierra y la Luna se indican en la columna de la izquierda. La siguiente columna señala cuándo, contando en millones de años desde el presente, tuvo lugar cada evento, descrito a continuación. La vida apareció en el Arcaico, hace entre 3800 y 3500 millones de años. Este periodo está destacado en verde. Las imágenes de la derecha representan (A) el posible aspecto de la Tierra primitiva, ya con presencia de estromatolitos; (B) un fósil de los primeros organismos eucariotas conservados en su totalidad (Grypania). (C) Una recreación de la fauna de Ediacara, identificada por primera vez en Australia y (D) un euriptérico, artrópodo marino muy abundante durante el Silúrico, periodo en el que aparecieron las primeras plantas (Cooksonia, representada en la imagen, tenía alrededor de cinco centímetros de altura).

edad han quedado restos que asemejan estructuras celulares, y que algunos investigadores interpretan como los primeros fósiles (*Isua-sphera*). Sin embargo, aún no existe consenso sobre el posible origen biológico de estas estructuras, halladas en la isla de Akilia (Groenlandia). Los microfósiles y los estromatolitos más antiguos datan de hace 3.500 millones de años, fecha en que, con toda seguridad, la vida había aparecido. La atmósfera terrestre era fuertemente reductora en aquel tiempo, ya que el oxígeno atmosférico no fue abundante hasta hace unos 1.800 millones de años. El cambio en la composición de la atmósfera lo ocasionó la aparición de organismos fotosintéticos hace 2.700 millones de años. El metabolismo de estas células expulsaba como desecho grandes cantidades de oxígeno, iniciando así la transición hacia una atmósfera oxidante. Éste resultó ser un gas letal para gran parte de los organismos presentes en aquel entonces, y transformó progresivamente el aspecto de la Tierra y la composición de su biosfera. Hasta ese momento, todos los seres vivos de la Tierra eran procariotas, organismos unicelulares sencillos. Aunque hay algunas evidencias indirectas de la presencia de eucariotas hace 2.650 millones de años, los fósiles inequívocos de este dominio datan de hace 2.100 millones de años. La célula eucariota posee un núcleo diferenciado y una complejidad estructural indispensable para que, algunos cientos de millones de años más tarde, aparecieran los seres pluricelulares. El registro fósil con los primeros animales tiene una antigüedad de unos 1.000 millones de años.

Tanto el conocimiento que establece la cronología de la vida como el relativo a su diversidad es bastante reciente. Hasta hace apenas veinte años la clasificación de los organismos vivos se basaba en su fenotipo, es decir, en sus características observables (morfología, comportamiento, adaptaciones...). Actualmente, las técnicas de secuenciación del genoma han permitido realizar una clasificación más objetiva basándose en la comparación sistemática de diversos genes y, en particular, del ribosoma celular. De esta forma se ha conseguido establecer los tres dominios de la vida (arquea, bacteria y eucaria) y se ha demostrado, sin lugar a dudas, que todos los seres vivos proceden de un único antepasado común. A este progenote, hipotético organismo unicelular que habitó la Tierra hace al menos 3.500 millones de años, se le designa con el acrónimo de LUCA (*Last Universal Common*

Ancestor). Poco sabemos de los estadios anteriores a la aparición de las primeras células, de los pasos necesarios en la transición entre materia inerte y sistemas vivos.

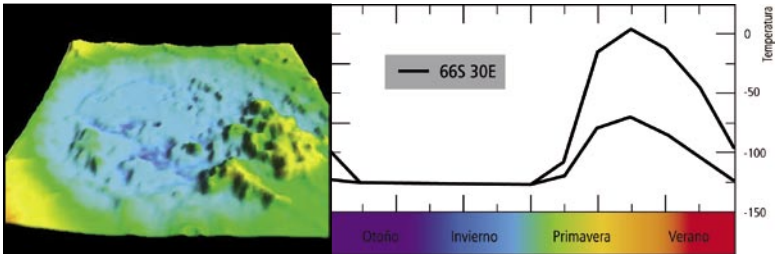
En 1953, el mismo año en que se descubrió la estructura de la molécula de ADN, un estudiante de Harold Urey llamado Stanley Miller llevó a cabo un experimento que marcó un hito en el estudio empírico del origen de la vida. Considerando que la atmósfera primigenia de la Tierra era altamente reductora, Miller introdujo en un matraz agua, hidrógeno, metano y amoníaco, mezcla que sometió posteriormente a descargas eléctricas. Los resultados de su experimento no podían ser más alentadores: en pocos días se había generado una gran cantidad de compuestos de carbono, entre los cuales se identificaron muchos de los aminoácidos que forman parte de los seres vivos.

Lamentablemente, poco se ha avanzado hacia la síntesis abiótica de moléculas más complejas en los cincuenta años transcurridos desde entonces. Es cierto que conocemos varias formas de síntesis de los bloques químicos básicos necesarios para la vida a partir de compuestos inorgánicos, pero quedan sin resolver cuestiones fundamentales como el origen de las primeras moléculas auto replicativas, la aparición de los ciclos metabólicos básicos (que se estiman previos a la emergencia de sistemas auto mantenidos), la selección de la quiralidad molecular, o el mecanismo que permitió la separación entre moléculas que codifican la información (actualmente el ADN) y las que llevan a cabo de forma eficiente las reacciones químicas en el interior celular (las proteínas).

En este sentido podemos hablar de varias teorías sobre el origen de la vida, ninguna de ellas completa, que intentan enlazar el tiempo en el que los bloques químicos básicos para la vida estuvieron disponibles con la aparición de LUCA. Entre los escenarios más plausibles se halla el mundo de ARN (ácido ribonucleico), molécula que actualmente cumple funciones tanto en la codificación de la información como en la catálisis de reacciones químicas. También se especula con el importante papel que podían haber desempeñado superficies minerales y metálicas en las reacciones químicas prebióticas. Otros investigadores apuntan la posibilidad de que, antes que moléculas con capacidad



Marte es un planeta dinámico, con cambios estacionales semejantes a los de la Tierra. Durante el invierno del hemisferio sur, el planeta se cubre con un manto de dióxido de carbono. Esta cubierta invernal sublima cuando aumenta la temperatura, al inicio de la primavera, y la mayor parte del CO₂ se traslada al hemisferio norte, donde empieza el otoño y con él la deposición de hielo de CO₂. Lo mismo sucede en el hemisferio norte medio año marciano más tarde.



Pityusa patera es una región formada por un cráter de impacto, flanqueada al sureste por montañas de hasta 1600 m de altitud, y situada a 66 grados de latitud sur. El cráter tiene unos 330 km de diámetro. (C) Variación estacional de la temperatura en la zona de Pityusa patera. A finales de primavera, incluso a tan altas latitudes, la temperatura puede alcanzar los cero grados Celsius.

replicativa, aparecieran pequeñas vesículas en el interior de las cuales se hubiese seleccionado un metabolismo básico que les permitiera auto mantenerse y eventualmente crecer y duplicarse. Es probable que, si algún día conseguimos establecer una secuencia plausible de eventos conducentes a la aparición de la vida, parte de estas teorías y también de otras colaboren en su síntesis.

Diversa y ubicua

Lo cierto es que, en la actualidad, la vida se ha diversificado y ha ocupado prácticamente todos los ambientes disponibles en la Tierra. Nuestro conocimiento de la biodiversidad se amplía continuamente, si bien nos queda mucho por descubrir en lo que respecta a la diversidad de microorganismos, debido principalmente a la dificultad para cultivarlos en el laboratorio. Las nuevas técnicas de secuenciación se han revelado fundamentales para identificar organismos en su medio natural, y en particular han permitido establecer un dominio vital completo, el de las arqueas. Las arqueas son muy parecidas morfológicamente a las bacterias, aunque la distancia entre sus genomas (también en su organización celular) es enorme. La característica más relevante de las arqueas reside en su capacidad de adaptación a ambientes que, con anterioridad, eran considerados claramente hostiles a la vida. Y es que la mayoría de las arqueas que conocemos son organismos extremófilos. Esto quiere decir que son capaces de colonizar ambientes extremos (por oposición a un ambiente mesófilo, que es aquél en el que un ser humano se siente cómodo), en los que han desarrollado adaptaciones que les permiten crecer y replicarse con relativa facilidad. La clasificación sistemática de los organismos extremófilos fue inaugurada en la década de 1960 por Thomas D. Brock y su grupo, quienes identificaron los primeros organismos hipertermófilos en el parque natural de Yellowstone (EEUU).

La ubicuidad del dominio arquea ha obligado a replantear cuáles son las condiciones ambientales mínimas que la vida requiere. Si confeccionásemos una lista con estas condiciones, probablemente incluiríamos la presencia de agua, una fuente de nutrientes o elementos bási-

Algunos ambientes extremos y organismos adaptados a ellos

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

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 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.

cos para que el metabolismo sintetice moléculas más complejas y, por supuesto, una fuente de energía. Quizá estaríamos tentados de añadir que la vida requiere oxígeno, ausencia de radiación, temperatura y presión moderadas, pH neutro... Nada más lejos de la realidad. Tomando el único ejemplo de vida que conocemos, la de la Tierra, sabemos ahora que las únicas tres condiciones imprescindibles son agua, nutrientes y 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 ocurre que no sabemos qué buscar...

Recorramos algunos de los ambientes donde, inesperadamente, hemos descubierto que la vida se desarrolla. Si bien aún existen limitaciones a las temperaturas máximas y mínimas que permiten el correcto funcionamiento del metabolismo, los límites actuales sitúan en unos -20°C el mínimo y en unos 120° el máximo (aunque estas no son las temperaturas de crecimiento óptimas sí hay organismos que sobreviven en estas condiciones). Así, hay organismos psicrófilos capaces de sobrevivir 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 muy por encima de los 100°C . Y, ya en superficie, otros muchos colorean zonas de aguas termales, donde al barro 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 medran. 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 los ejemplos más notables es el río

Tinto, en la provincia de Huelva (España), que debe su nombre al color de sus aguas. Su 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 del río. A pesar de la toxicidad de sus aguas, el río Tinto cobija una enorme diversidad de organismos, no sólo dentro del dominio arquea sino también de los dominios bacteria 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 suficientemente hostil. El paradigma de microorganismo resistente a radiación es *Deinococcus radiodurans*, muy común en ambientes orgánicos (como carne envasada), pero capaz de resistir dosis de radiación mil 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 túneles hacia el interior de la Tierra con objeto de establecer la presencia de microorganismos a gran profundidad y determinar sus características. Podemos 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.

Buscando respuestas en Júpiter y Marte

¿Dónde podríamos, a la vista de todos estos resultados, poner los límites a la adaptabilidad de la vida? ¿Cómo podríamos afirmar que un ambiente donde agua, minerales y energía se unen es estéril? Dado que es difícil imaginar las formas en que la vida consigue adaptarse, quizá sucede que no somos aún demasiado hábiles buscando. Tampoco podemos sostener que las soluciones concretas halladas en un

ambiente dado deban ser las mismas en un ambiente semejante si la evolución y adaptación de los organismos se ha producido de forma independiente. Así pues, ¿qué buscar, y cómo? Esta es la mayor dificultad a la que nos enfrentamos a la hora de desarrollar tecnología concreta que nos ayude en la búsqueda de vida en otros cuerpos del Sistema Solar. Conscientes de nuestras limitaciones, empezamos por lo más sencillo, que es seguir el rastro del agua. Los satélites de hielo de Júpiter (en particular Europa) y Marte contienen cantidades de agua muy superiores a las que se imaginaban hace un par de décadas. Además, debido a su relativa proximidad a la Tierra, estos dos sistemas se han convertido en objetivo de gran interés en la investigación astrobiológica.

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 cubre 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 que ese color delate, en realidad, una composición rica en compuestos de carbono presentes en ese hipotético océano y que llegarían a la superficie a lo largo de las grietas en el hielo. Las respuestas fiables a los interrogantes planteados por los satélites de hielo tendrán que esperar aún algunas décadas.

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 ter-

cio 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 dióxido de carbono (CO₂), lo que significa que la temperatura en ese lugar es inferior a -128°C , temperatura a la que solidifica. 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 queda parcialmente expuesto en superficie. Los modelos detallados del clima marciano predicen que, en los períodos más cálidos del año, la temperatura en ciertos lugares supera los 0°C . Medidas directas tomadas recientemente 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-. Con estas condiciones, no sería descabellado que incluso algunos organismos terrestres pudieran sobrevivir en estos microclimas, alternando un estado de crecimiento y reproducción durante estos breves períodos de bonanza con un estado aletargado, inactivo, el resto del año.

El programa de exploración de Marte quizá permitirá tomar muestras de su superficie y devolverlas a la Tierra para su estudio en un futuro próximo. Creemos que entonces podremos determinar si Marte está habitado o no. Si obtenemos una respuesta positiva, la comparación de lo allí hallado con la vida de la Tierra nos revelará si el origen es común y, en tal caso, desde cuándo se produce una evolución independiente. A lo largo del siglo XXI esperamos explorar y determinar la presencia de vida en otros cuerpos del Sistema Solar. El estudio de planetas semejantes a la Tierra orbitando alrededor de otras estrellas estará limitado, sin embargo, a la realización de medidas indirectas. De momento no tenemos el conocimiento suficiente para afirmar con certeza, partiendo de una observación lejana, si un planeta está habi-

tado o no. Quizá ganaremos este conocimiento a medida que exploremos nuestro Sistema Solar. Y tal vez en un futuro no muy lejano, podamos por fin saber si la Tierra y sus habitantes resultaron de una más que improbable conjunción de casualidades o si otras formas de vida, con la misma química u otras que aún no podemos imaginar, pueblan el Universo que conocemos.

