

GUÍA INTRODUCTORIA AL TEMA

Origen de la vida

Introducción

Si a la mayoría nos fascina saber quiénes fueron nuestros antepasados y nos gustaría poder disponer de un árbol genealógico que se remontara muchas generaciones, ¿no sería aún más maravilloso poder prolongar ese árbol hasta nuestros ancestros más remotos, es decir, hasta el propio origen de la vida? Lo cierto es que a ninguno nos extraña que esta sea una de las incógnitas que mayor curiosidad ha suscitado en la humanidad a lo largo de su historia. Las cuestiones que plantea tienen profundas implicaciones filosóficas y teológicas y el contexto social de cada época ha influido enormemente en las hipótesis y teorías que se han formulado para abordar el problema. Sin embargo, la realidad es que todavía no sabemos con certeza cuáles fueron los eventos que condujeron a la aparición de las primeras formas de vida, algo que en parte se debe a que desconocemos cuáles eran las condiciones imperantes en la Tierra antes de la aparición de la vida. Es más, aunque las conociéramos y pudiéramos reproducirlas para iniciar el desarrollo de alguna forma de vida similar a las que hubo inicialmente, es altamente improbable que el resultado final, después de miles de millones de años de evolución marcados por las circunstancias ambientales de cada momento, fuera similar al que podemos observar actualmente.

La materia viva es tremendamente compleja, lo cual se manifiesta no solo en capacidades tales como el pensamiento o el movimiento, sino también en todos los procesos que tienen lugar a nivel celular y que hacen posible que la vida pueda mantenerse como tal. Durante siglos se creyó que esta complejidad se lograba gracias a la existencia de un principio vital que era capaz de hacer que la materia inerte adquiriera las propiedades de la materia viva. Sin embargo, esta creencia es difícil de sostener cuando se sabe que no hay ningún elemento químico que sea exclusivo de la materia viva. Esta está formada por agua y materia orgánica, la cual a su vez está constituida por un número no demasiado alto de moléculas básicas (aminoácidos, bases nitrogenadas, azúcares, vitaminas, etc.), la mayoría de las cuales han podido ser sintetizadas con éxito en experimentos llevados a cabo en el laboratorio. Vistas así las cosas, los estudios sobre el origen de la vida deberían enfocarse al conocimiento de los procesos que han permitido que la materia se

organice de modo que la transición entre el mundo químico y el mundo biológico sea posible.

Otras cuestiones de gran relevancia relacionadas con el origen de la vida son: ¿es la Tierra el único planeta habitado?, ¿cuáles son nuestras relaciones con el resto de los seres vivos?, ¿qué función representa la vida en la evolución del Universo?, ¿ha surgido por azar o existe una fuerza que, dadas determinadas circunstancias, determina su aparición? Todas estas cuestiones, formuladas de forma más o menos explícita, han inquietado a la humanidad desde sus orígenes. En ocasiones, las respuestas venían de la mano de las mitologías o las religiones y otorgaban al hombre un papel central, alrededor del cual giraba el resto de la vida sobre la Tierra. Sin embargo, poco a poco la ciencia fue tomando el lugar de los mitos, lo que significó que tuviéramos que aceptar que somos una especie más, en un planeta más de entre los muchos que existen en el Universo. Primero fue la teoría heliocéntrica, formulada por Nicolás Copérnico en el siglo XVI y demostrada por Galileo Galilei en el siglo XVII, la que reveló que la Tierra no era el centro del Universo conocido, sino que este era el Sol, alrededor del cual se movía la Tierra junto con otros cuerpos celestes. Más adelante fueron las teorías evolutivas de Charles Darwin las que nos mostraron que no somos los "reyes de la creación". En lugar de eso, resulta que somos el resultado de miles de millones de años de evolución sin ningún fin predeterminado. Han sido el azar y las circunstancias particulares de nuestro planeta las que han permitido que el ser humano esté hoy aquí. Si las circunstancias hubieran sido distintas, posiblemente la vida que existiera en la Tierra sería diferente de la que observamos ahora, y podría ser que el hombre ni siquiera hubiera hecho su aparición. Más recientemente, hemos sido conscientes de que nuestro planeta y nuestro Sistema Solar no son más que una mínima parte de un Universo en el que se estima que pueden existir varios cientos o incluso miles de trillones de planetas. Con estos números es casi imposible pensar que solo en uno de esos mundos haya podido surgir la vida. Y una vez que surge la vida hace su aparición, la evolución se encarga del resto haciendo que esta aumente en complejidad y se extienda por todos los lugares posibles.

El hecho de que la única forma de vida que conocemos sea la terrestre no nos dice mucho sobre si la transición entre la materia inerte y la materia viva podría darse en condiciones diferentes de las que imperan en nuestro planeta. Sin embargo, actualmente sabemos que en la Tierra existen microorganismos, los microorganismos extremófilos, capaces de vivir en condiciones que antes se consideraban absolutamente limitantes para la existencia de vida (temperaturas mayores de 100° C, profundidades de varios kilómetros bajo la superficie marina o

terrestre, pHs extremadamente ácidos, etc.). Estos hallazgos, unidos a la constatación del gran número de planetas que existen, han ampliado enormemente nuestras esperanzas de que la vida también haya podido haber surgido en otros lugares del espacio, aun cuando presenten características ambientales muy diferentes de las que imperan en la mayor parte de nuestro planeta.

Toda la vida que existe en la Tierra tiene un origen común

La diversidad de formas que puede adoptar la vida en la Tierra es algo que no puede dejar de sorprendernos. El rango de tamaños abarca varios órdenes de magnitud, desde los seres vivos más pequeños, como las bacterias, hasta los más grandes, representados por las ballenas azules, los elefantes o las secuoyas. Además de colonizar los tres grandes ambientes (tierra, mar y aire), la vida también se las ha ingeniado para poder desarrollarse en una variedad de condiciones físico-químicas, algunas de las cuales pueden parecer tremendamente inhóspitas. La morfología, tipo de metabolismo, grado de complejidad, formas de relacionarse con el medio y con otros seres vivos son otra serie de características que podríamos añadir a esa lista de diferencias que nunca seríamos capaces de terminar.

Si no supiéramos nada más, estaríamos tentados de concluir que ha habido múltiples orígenes de la vida, cada uno con un destino diferente. Sin embargo, cuando la vida se analiza a nivel molecular, se observa que la lista de semejanzas es mayor que la de diferencias. Más aún, parece que las semejanzas se dan a un nivel más fundamental, mientras que las diferencias, en la mayoría de los casos, podrían interpretarse como soluciones particulares adoptadas en ambientes concretos. Así, aunque la vida pueda diferir en el tipo de energía externa que utiliza, a nivel celular todos los tipos de metabolismo están basados en la transferencia de electrones desde unas moléculas a otras. Puede haber diferencias entre las especies moleculares utilizadas, pero el proceso esencial es el mismo siempre. En todos los organismos la catálisis de las reacciones químicas propias de la vida es llevada a cabo por proteínas con actividad enzimática, cuya secuencia de aminoácidos está codificada en la molécula de ADN siguiendo unas reglas universales. Otro hecho sorprendente es que, de las dos formas estereoquímicas que pueden adoptar los aminoácidos (la L y la D), los que forman parte de la vida siempre se encuentran en la forma L.

En principio, no hay ninguna razón para que las proteínas no pudieran estar formadas por D aminoácidos, o que el código utilizado para almacenar la información genética siguiera otras reglas. Incluso podríamos pensar en otro tipo

de polímero que almacenara esta información. En todos esos casos la vida podría haber seguido funcionando, mejor o peor, pero seguiría siendo vida. Entonces, ¿por qué no hay seres cuyas proteínas están formadas por D aminoácidos? o ¿por qué el mismo triplete de nucleótidos significa siempre que la proteína correspondiente debe incorporar un aminoácido concreto?

Las observaciones anteriores apuntan a que toda la vida que existe en la Tierra tiene el mismo origen. Este antepasado común suele denominarse LUCA, por las siglas en inglés de "Last Universal Common Ancestor". Aunque en los libros de biología se habla mucho sobre LUCA, la realidad es que desconocemos casi todo sobre él. Se estima que LUCA vivió hace entre 3.800 o 3.500 millones de años y, en épocas tan remotas, ya debía contener todos los genes necesarios para llevar a cabo las funciones esenciales de la vida. Se ha estimado que ese número de genes podría estar entre quinientos y mil. Muchos de ellos aún persisten en nuestros genomas, aunque con las modificaciones esperables después de tan largo espacio de tiempo.

Buscando una definición universal de vida

Imaginemos que vamos en una expedición en búsqueda de vida en otro planeta. ¿Estaríamos seguros de que, de encontrarla, seríamos capaces de reconocerla? Podría ser que no, si esa vida fuera muy diferente de la terrestre. ¿Qué tenemos que buscar entonces? ¿Qué características tendría que presentar un trozo de materia que encontraríamos fuera de la Tierra para poder decir con certeza que es un ser vivo? Imaginemos ahora que estamos investigando el origen de la vida en un laboratorio y estamos realizando experimentos en los que intentamos que la materia inerte se vaya pareciendo cada vez más a la materia viva. ¿Cuándo podríamos estar seguros de que lo que tenemos en el tubo de ensayo ha adquirido vida? Parece claro que necesitamos tener una definición universal de vida que establezca límites claros entre lo vivo y lo inerte, que sea válida para la vida terrestre y para la posible vida extraterrestre, es decir, que capte qué es lo esencial de la vida y lo separe de las soluciones particulares que esta ha podido adoptar en cada planeta o ambiente químico particular. Una planta puede ser una solución particular de la vida para poder captar la energía del Sol en el ambiente terrestre. Siguiendo con esa lógica, el ADN podría ser la solución encontrada para almacenar las instrucciones de la vida de la Tierra, pero, en otros lugares, quizás podría haber otras moléculas que también pudieran llevar a cabo esa función.

El estudio de la única vida que conocemos, la terrestre, puede ser un buen punto de partida para intentar identificar qué propiedades (tanto a nivel de composición y

estructura como a nivel de procesos) son esenciales y, por tanto, deberían ser incluidas en una definición universal de vida. El objetivo, sin embargo, no es fácil, debido a que, como hemos indicado, toda la vida que existe en la Tierra procede de un ancestro común. Esta situación hace que sea complicado distinguir si las propiedades que comparten los organismos terrestres son requisitos necesarios para que la vida pueda existir o están ahí simplemente porque han sido heredadas del mismo progenitor.

La mayoría de los científicos que se dedican al estudio de la vida defienden que esta tiene varias propiedades esenciales que son las siguientes:

Metabolismo. El metabolismo puede definirse como la transformación de la materia y la energía del medio externo en materia y energía utilizables por la vida. Las fuentes de energía pueden ser tan diversas como la luz solar, reacciones químicas inorgánicas que tienen lugar en el ambiente o la energía contenida en los enlaces de los compuestos orgánicos sintetizados por otros seres vivos. Respecto a la fuente de materia, si nos fijamos en el elemento fundamental de los seres vivos, el carbono, este puede obtenerse directamente del dióxido de carbono atmosférico o, nuevamente, del contenido en las moléculas orgánicas que han sido elaboradas por otros seres vivos. El metabolismo implica la realización de un número muy elevado de reacciones químicas diferentes en las que unos productos se transforman en otros, bien para obtener la energía necesaria para los procesos celulares, bien para construir las moléculas y estructuras propias de la célula.

Almacenamiento y procesamiento de información. Es necesario que exista un sistema de almacenamiento de las instrucciones con las que funciona la vida y que este sistema sea además transmisible a la descendencia. Esta información es la información genética y, en el caso de la vida terrestre, está contenida en los genomas, concretamente en la molécula de uno de los dos tipos de ácidos nucleicos que existen, el ácido desoxirribonucleico o ADN, el cual está formado por la unión de un tipo de monómeros denominados nucleótidos.

Capacidad de evolución y adaptación al ambiente. La evolución parece ser una consecuencia imprescindible del hecho de mantener una información que debe perpetuarse a lo largo de las generaciones. En algún momento la información tiene que ser copiada y no hay ningún sistema de copia que sea cien por cien perfecto. Siempre se producen errores o mutaciones que son las responsables de que los individuos que componen las poblaciones sean diferentes. Sobre esta variabilidad actuará la selección natural, de modo que los individuos con mayor capacidad reproductora acabarán estando más representados. La evolución es lo que ha

permitido que la vida terrestre, aun siendo tan similar cuando se analiza en profundidad, presente formas tan diversas y esté presente en prácticamente todos los ambientes que existen en nuestro planeta.

Compartimentación. Es obvio que cualquier sistema vivo tiene que estar contenido en algún tipo de estructura que lo diferencie claramente de su entorno. No solo para evitar que sus componentes se dispersen en el medio externo, sino también para poder mantener unas condiciones físico-químicas que permitan que las reacciones propias de la vida puedan realizarse. En el nivel más básico, esta función de aislamiento la realiza la membrana plasmática que rodea las células.

Reuniendo todas las propiedades esenciales que hemos indicado, una definición adecuada de vida podría ser la siguiente: Un sistema automantenido con capacidad de almacenar y transmitir información y susceptible de evolucionar para adaptarse a los cambios que tienen lugar en el ambiente. Lo que cabe preguntarse ahora es hasta qué punto los medios que utiliza la vida terrestre para lograr esas propiedades tienen que ser forzosamente así o, dependiendo de las circunstancias ambientales, podrían haber sido sustituidos por otros. Por ejemplo, si consideramos que el mantenimiento de la información es esencial para la vida podríamos preguntarnos si es el ADN la única molécula capaz de conseguir ese propósito. Si llegamos a la conclusión de que sí, entonces cualquier tipo de vida que pueda existir debería contener ADN, y entender cómo puede surgir esa molécula sería fundamental para entender cómo podría haber surgido la vida en cualquier lugar del Universo que la busquemos. Sin embargo, si somos capaces de pensar en otras moléculas que puedan llevar a cabo la misma función, las posibilidades son mayores, pero probablemente también mucho más difíciles de examinar. Y el mismo razonamiento se aplica a las proteínas, el tipo de metabolismo, el tipo de estructuras para aislarse del entorno... Como vemos, no es sencillo esto de definir la vida y entender lo que hace posible su origen.

Algunas aproximaciones no científicas para el origen de la vida

Dada la enorme complejidad de los procesos subyacentes a la vida, no es de extrañar que en la mayoría de las culturas se haya recurrido a la figura de un "Creador" para explicar su origen. Durante mucho tiempo, en Occidente se aceptó literalmente el relato de la Biblia sobre la creación, según el cual el Universo, la Tierra, los seres vivos y la especie humana fueron creados en seis días y en la forma que tienen actualmente. Ahora sabemos que la Biblia no puede interpretarse en sentido literal. La teoría de la evolución está completamente aceptada y hay suficientes evidencias científicas que muestran que en su origen la vida no fue

diseñada en la forma en que la conocemos. En su lugar, todas las especies actuales –y las que ya se han extinguido- proceden de la evolución, a partir de un ancestro común que fue cambiando y diversificándose para adaptarse a los distintos ambientes que existen en la Tierra.

Otra teoría “no científica” sobre el origen de la vida es la de la generación espontánea, que se remonta a la época de Aristóteles y que no se consiguió rebatir hasta finales del siglo XIX. Esta teoría -basada en la observación de que bajo ciertas condiciones podían aparecer pequeños organismos, o incluso ratones, aparentemente de la nada- defiende que la vida puede surgir de forma espontánea a partir de la materia inerte, por adquisición de algo indefinido que se llamó principio vital. La refutación de la generación espontánea, que fue posible gracias a los experimentos de Francesco de Redi, Lazzaro Spallanzani y Louis Pasteur, representó un gran hito para la ciencia al demostrar que la vida, incluso la de los microorganismos, solo procede de la vida. Sin embargo, al menos una vez en su historia, la vida tuvo que surgir a partir de la materia inerte. De este modo, en ausencia de las mágicas propiedades atribuidas al principio vital, comenzó el interés por la identificación de los procesos químicos y físicos que condujeron a la aparición de la vida, surgiendo así las primeras aproximaciones científicas a su origen. Pero para saber qué procesos eran posibles en la Tierra primitiva es importante saber qué condiciones ambientales imperaban entonces y eso nos lleva a preguntarnos por el momento en que la vida hizo su aparición.

¿Cuándo surgió la vida en la Tierra?

Para responder a esta pregunta la mejor herramienta de la que disponemos es la búsqueda de signos de vida en las rocas antiguas. Estos signos de vida pueden tomar la forma de biomarcadores -moléculas que son producto de la acción de la vida- o de fósiles microscópicos. El principal problema que existe para este tipo de análisis es que en la Tierra no podemos encontrar rocas de edades muy antiguas, ya que, debido a la acción de la tectónica de placas, la corteza terrestre está sometida a un proceso continuo de renovación. Este hecho, unido a la erosión de los materiales causada por los agentes físicos externos, tiene como consecuencia que las rocas con antigüedad mayor de unos 3.000 millones de años sean muy escasas. Aun así, las relaciones entre los isótopos estables del carbono, carbono-13 y carbono-12, detectadas en ciertas rocas metamórficas encontradas en Canadá - que parecen tener una antigüedad de unos 4.100 millones de años- sugieren que en esa época tan temprana ya podían existir procesos que conducían a la fijación de carbono, de forma similar a como lo hace la vida, es decir asimilando preferentemente el isótopo más ligero.

Las rocas sedimentarias más antiguas encontradas tienen 3.800 millones de años y proceden del desierto de Isua, en Groenlandia. Estas rocas contienen inclusiones de carbono en forma de grafito con una relación isotópica que nuevamente sugiere un origen biótico, aunque esto no se puede afirmar con certeza. Las primeras evidencias fósiles de vida, aceptadas casi unánimemente por la comunidad científica, tienen una antigüedad de unos 3.500 millones de años y corresponden a estromatolitos, que son comunidades de microorganismos fosilizados en láminas superpuestas. De esta misma época son los microfósiles más antiguos encontrados en rocas procedentes de África y Australia, los cuales muestran morfologías compatibles con células individuales o filamentos formados por la asociación entre ellas.

La edad de nuestro planeta se estima en unos 4.570 millones de años. Durante los primeros 170 millones de años de su existencia, la Tierra tenía unas temperaturas altísimas, debidas al calor generado por la desintegración de elementos radiactivos y los continuos impactos de meteoritos que recibía. Después, poco a poco, se fue enfriando y hace unos 4.350 millones de años ya se había formado una corteza sólida que pronto fue cubierta por un gran océano de agua líquida que cubría casi todo el planeta y en el que podrían haberse producido algunas de las reacciones químicas precursoras de la vida. Sin embargo, cualquier intento de originar vida en esta época fue probablemente eliminado, debido a una segunda oleada de bombardeo de meteoritos que tuvo lugar en el periodo comprendido entre hace 4.000 y 3.850 millones de años. A partir de este momento, las condiciones de nuestro planeta comenzaron a ser más estables y favorables para la vida.

El hecho de que se hayan encontrados signos de vida bacteriana en rocas de hace 3.500 millones de años plantea el problema de que solamente existe un periodo de unos 350 millones de años desde que acabó el segundo bombardeo meteorítico hasta que surgieron las primeras células de las que tenemos noticia. Este periodo parece demasiado corto para que pudieran tener lugar todos los procesos necesarios para la aparición de la vida, los cuales incluyen la síntesis de moléculas orgánicas sencillas y su posterior ensamblaje para dar lugar a polímeros más complejos, la aparición de las primeras moléculas capaces de almacenar información y transmitirla a las moléculas hijas a través de su replicación (su copia), el uso de energía acoplado a la replicación (lo que representaría una de las formas primitivas de metabolismo) y, por último, la aparición de estructuras capaces de integrar conjuntos de esas moléculas en un compartimento que impidiera su dilución en el medio externo.

Para intentar explicar la aparición de vida en épocas tan tempranas de la historia de nuestro planeta se propuso la teoría de la panspermia que sostiene que la vida se generó en el espacio exterior, desde donde viaja de unos planetas a otros, y de unos sistemas solares a otros. El filósofo griego Anaxágoras fue el primero que propuso un origen cósmico para la vida, pero fue a partir del siglo XIX cuando esta hipótesis cobró auge, debido en parte a la detección de abundante materia orgánica -como hidrocarburos, ácidos grasos, aminoácidos y ácidos nucleicos- en algunos meteoritos. El máximo defensor de la teoría de la panspermia fue el químico Svante Arrhenius, que afirmaba que la vida provenía del espacio exterior en forma de esporas bacterianas que viajan por todo el espacio impulsadas por la radiación de las estrellas.

Aunque parece poco probable que algún tipo de microorganismos pudiera extenderse por el cosmos, sobreviviendo al vacío, los rayos cósmicos y la radiación ultravioleta, actualmente se ha demostrado que las bacterias y sus esporas, cuando se hallan en el interior de rocas, son sumamente resistentes a estos agentes físicos, por lo que no es impensable que, bajo determinadas circunstancias, pudieran viajar entre unos planetas y otros. Por otro lado, aquí mismo en la Tierra, se han descubierto bacterias como *Deinococcus radiodurans* e, incluso, animales microscópicos como los tardígrados que poseen mecanismos de reparación de su ADN que les permiten resistir altísimas dosis de radiación. Estos hallazgos, aunque no responden al problema del origen de la vida plantean que una vez que esta hizo su aparición pudo viajar a otros planetas cercanos. Un ejemplo frecuentemente citado de este hipotético tráfico de microorganismos entre planetas es el que pudo suceder entre Marte y la Tierra. Ambos planetas se formaron casi a la vez e inicialmente compartían bastantes características. Sin embargo, Marte sufrió menos impactos meteoríticos y además su menor tamaño facilitó que se enfriara antes. La hipótesis de que la vida terrestre surgiera en Marte y posteriormente viajara a la Tierra protegida en el interior de una roca añade aún mayor interés a la búsqueda de vida en nuestro planeta vecino, ya que contribuiría a aclarar cuáles fueron nuestros orígenes. Sin embargo, la pregunta fundamental, ¿cómo surgió esa vida?, quedaría sin responder.

En el año 1969 cayó en Murchinson (Australia) un meteorito en el cual se encontraron restos de hidrocarburos y también aminoácidos similares a los que se encuentran en las proteínas terrestres. El hecho de que, además, algunos de estos aminoácidos presentaran un exceso de la forma L, el estereoisómero presente en la vida terrestre, dio fuerza a la idea de que la llegada de moléculas orgánicas a la Tierra primitiva, procedentes de otros lugares del espacio, podría haber acelerado

los procesos previos a la aparición de la vida. Actualmente está fuera de duda que la materia orgánica encontrada en el meteorito de Murchinson no es el resultado de la contaminación que podría haber ocurrido al entrar en contacto con la atmósfera terrestre. Posteriormente se ha encontrado materia orgánica en otros meteoritos, sobre todo en los de tipo condrítico, y también en cometas y en las nubes de polvo interestelar, indicando que la síntesis de materia orgánica no es un hecho inusual en el espacio.

Los primeros pasos para el origen de la vida

Ya en 1871, Darwin argumentaba que la vida podría haber surgido en "una pequeña charca de agua templada que contuviera todo tipo de sales de fósforo y amonio, luz, calor, electricidad y carbono, en la cual un compuesto proteico se formara químicamente, quedando listo para sufrir cambios aún más complejos". Las ideas de Darwin sobre cómo pudo surgir la vida cristalizaron en las hipótesis de Alexander Oparin y John Haldane, propuestas en publicaciones independientes durante la década de 1920. Estas hipótesis consideran que el primer paso que condujo a la aparición de la vida fue la síntesis de moléculas orgánicas en una atmósfera primitiva, esencialmente reductora y carente de oxígeno, utilizando como energía la luz ultravioleta del sol. Las sustancias orgánicas se irían acumulando en lagos o mares poco profundos, donde se combinarían con otras dando lugar a una mezcla que recibió el nombre de "sopa primordial". Este caldo sería la base para sintetizar moléculas más complejas que mediante procesos de evolución molecular facilitarían la aparición de la vida celular.

Esta teoría se vio enormemente reforzada en 1953, cuando Stanley Miller realizó su famoso experimento, el cual básicamente consistió en introducir una mezcla de gases, similar a la que se creía que componía la atmósfera primitiva (vapor de agua, metano, amoníaco e hidrógeno), en una cámara en la que se suministró energía por medio de descargas eléctricas que emulaban las que se producen en los rayos que ocurren durante las tormentas. Los gases reaccionaron entre sí y dieron lugar a la síntesis de diversos aminoácidos, algunos azúcares y varias de las bases nitrogenadas que forman parte de los ácidos nucleicos, demostrándose así que la síntesis de muchos de los componentes esenciales de la materia viva era posible en condiciones abióticas. El experimento de Miller marcó el inicio de un nuevo campo de investigación, la química prebiótica, que se dedica a investigar la síntesis de compuestos orgánicos en las condiciones físicas y con los ingredientes químicos que pudieron estar presentes en la Tierra primitiva.

Puesto que la composición de la atmósfera primitiva no se conoce con certeza, en experimentos posteriores se han introducido variaciones en la composición química de los gases que reaccionaban, lo cual ha permitido la síntesis de otros compuestos. También se ha ensayado la presencia de iones metálicos como catalizadores y se han utilizado otras fuentes de energía, como la radiación ultravioleta. Utilizando aproximaciones de este tipo se han podido identificar posibles vías que conducen a la síntesis de muchas moléculas que juegan un papel fundamental en la composición de la materia viva. Sin embargo, hay moléculas esenciales que no han podido ser sintetizadas de forma eficiente en experimentos similares al de Miller, como los azúcares ribosa y desoxirribosa o los ácidos grasos de cadena larga que forman las membranas celulares actuales. La formación de polímeros más complejos (proteínas o ácidos nucleicos) tampoco ha podido ser resuelta por los experimentos de química prebiótica. Se ha propuesto que esta síntesis podría estar favorecida si tuviera lugar sobre ciertos materiales como las arcillas, que actuarían como catalizadores, atrayendo y concentrando en su superficie a las moléculas sencillas y favoreciendo su polimerización.

La trascendencia del experimento de Miller y los otros muchos que se realizaron después es la de mostrar que mediante procesos puramente abióticos se podían sintetizar los componentes básicos de la vida. Ninguno de estos experimentos demuestra que las cosas tuvieron que ocurrir así necesariamente, pero indican que hay caminos posibles para el origen de la vida a partir de la química. Lo importante ahora es estudiar si esos caminos podrían haber tenido lugar en las condiciones ambientales que presentaba nuestro planeta hace unos 3.800 millones de años.

Más allá del experimento de Miller

Actualmente hay muchas evidencias de que uno de los compuestos químicos esenciales en el origen de la vida fue el cianuro de hidrógeno, también conocido como ácido cianhídrico cuando está en solución acuosa. El cianuro de hidrógeno, junto con otros compuestos como el acetileno y el vapor de agua es un sustrato excelente para la síntesis química de las bases nitrogenadas que forman parte de los ácidos nucleicos. Además, hay muchas fuentes diferentes de energía (luz ultravioleta, relámpagos, impactos) que pueden generar cianuro de hidrógeno en una atmósfera reductora para ser depositado posteriormente en los océanos. El problema es que el cianuro de hidrógeno, cuando está en un medio líquido, se hidroliza rápidamente, dejando de ser útil para reacciones posteriores. Recientemente, el grupo del investigador John Sutherland ha propuesto un escenario que permitiría la acumulación de cianuro de hidrógeno en depósitos cristalinos estables. La idea es que el cianuro de hidrógeno, cuando es depositado

en lagos o charcos en los que hay circulación de agua hidrotermal, podría reaccionar con los iones de las rocas disueltos. De este modo se formarían sales que a lo largo de miles o incluso millones de años podrían haberse acumulado en capas que representarían un reservorio estable de cianuro de hidrógeno para ser usado en nuevas reacciones.

Respecto a la formación de algunos de los compuestos que no han conseguido ser sintetizados en las reacciones de química prebiótica que implican experimentos similares al de Miller, tenemos fascinantes soluciones, entre ellas las procedentes nuevamente del laboratorio de John Sutherland. La formación de los nucleótidos a partir de sus componentes (ribosa o desoxirribosa, base nitrogenada y fosfato) es uno de esos temas que han traído de cabeza a los investigadores en química prebiótica durante décadas. El problema es muy simple: mezclando los tres compuestos en agua no ocurre nada, no hay ni rastro de la formación de nucleótidos, ni siquiera si a la reacción se añaden moléculas capaces de proporcionar energía. El rompecabezas podría haber sido resuelto abandonando el esquema que a nuestra mentalidad le parece más lógico, que es el de sintetizar por un lado la ribosa o la desoxirribosa, por otro la base nitrogenada y luego pretender unir ambas incorporando además una molécula de fosfato. La nueva aproximación para la síntesis de nucleótidos consistiría en poner juntas las moléculas simples que dan lugar a la formación de azúcares y bases nitrogenadas por separado, es decir cianuro de hidrógeno, acetileno y formaldehído. El resultado es la obtención de un compuesto que puede ser visto como un fragmento de azúcar unido a un fragmento de una base nitrogenada del tipo de las que forman parte de los ácidos nucleicos. Se ha comprobado que esta molécula podría ser usada después en reacciones que conducen a la síntesis de los nucleótidos. Esta vía no genera solo los nucleótidos correctos, ya que en algunos casos el azúcar y la base nitrogenada no quedan unidos de la forma adecuada. Pero sorprendentemente, la exposición a la luz ultravioleta, destruye los nucleótidos incorrectos y deja solo los que tienen la misma estructura que los que forman parte de la vida actual. Intrigante, ¿verdad?

El mundo del ARN

Aunque desde el experimento de Miller sabemos que la formación de aminoácidos en la Tierra primitiva es un proceso que puede ocurrir a través de múltiples vías, la unión de cientos de aminoácidos en el orden correcto para dar lugar a una proteína concreta parece algo prácticamente imposible de suceder por mero azar. En la vida actual, las proteínas funcionales pueden sintetizarse gracias a que el ADN lleva codificada la información sobre el orden en el que deben enlazarse los aminoácidos. Pero pasar de la secuencia del ADN a la secuencia de una proteína es un proceso

complejo, que a su vez requiere la intervención de otras proteínas –cuya secuencia también está codificada en el ADN- y estructuras complejas como los ribosomas. Parece, por tanto, que esta separación de información y función en dos moléculas diferentes plantea una paradoja que solo se puede resolver si admitimos que en la vida primitiva la información y la función residían en la misma molécula. Actualmente existe un consenso casi generalizado en que esa molécula era el ARN.

Que el ARN puede ser utilizado para almacenar la información hereditaria queda demostrado por la existencia de entidades biológicas como los viroides y los virus de ARN, cuya información genética reside enteramente en la molécula de ARN. Para entender las posibilidades catalíticas del ARN es necesario que primero revisemos cómo son las estructuras que puede formar esta molécula. A diferencia de las moléculas de ADN, que todas forman la misma estructura de doble hélice por apareamiento de cadenas complementarias, las moléculas de ARN tienden a permanecer como cadenas sencillas que, debido al apareamiento interno entre bases de la misma molécula, se pliegan dando lugar a estructuras secundarias y terciarias que maximizan su estabilidad. Lo importante es que, al igual que ocurre con las proteínas en el mundo actual, estas estructuras podrían facilitar la catálisis de ciertas reacciones químicas. Estas moléculas de ARN con capacidad catalítica se denominan ribozimas. La prueba definitiva de la importancia de las ribozimas en la vida actual, llegó en 1993 cuando el grupo de Harry Noller demostró que la actividad que cataliza la formación del enlace peptídico entre dos aminoácidos, no reside en ninguna proteína, sino en una región concreta de uno de los ARNs que forma parte de los ribosomas.

La potencialidad del ARN para catalizar reacciones es inmensa, como ha podido ser demostrado en experimentos de evolución *in vitro* en los que se han obtenido multitud de moléculas capaces de unirse a sustratos específicos o catalizar reacciones. Estos experimentos suelen comenzar con billones de moléculas de ARN generadas al azar que se someten a rondas sucesivas de amplificación y selección, introduciendo errores en el proceso de copia para aumentar la diversidad. A pesar de que la copia del ARN se realiza utilizando las enzimas que existen actualmente en las células -algo que no podía suceder en la Tierra primitiva-, estos ensayos han tenido una importancia crucial para demostrar que las moléculas también son susceptibles de evolución darwiniana y, por tanto, de optimización siguiendo las mismas reglas que siguen los organismos, un concepto de importancia crucial para asentar la idea de que antes de la evolución de la vida celular tuvo que haber una fase de evolución molecular.

A juzgar por cómo se traduce la información en las células modernas, siendo los tripletes del ARN mensajero los que son leídos en los ribosomas, podría ya pensarse que inicialmente la molécula que almacenaba la información era el ARN. De hecho, una vez que el ADN es transcrito para formar los ARN mensajeros, la mayoría de los procesos posteriores que ocurren durante la traducción de la información genética son llevados a cabo por el ARN.

Todas estas consideraciones han llevado a postular la existencia de un hipotético mundo de ARN, constituido por conjuntos de moléculas, los denominados replicadores primitivos, capaces de almacenar y transmitir información a través de su copia. Las propiedades catalíticas de esas mismas moléculas habrían facilitado que en ese mundo surgiera un metabolismo simple, que una vez individualizado en un compartimento habría sido la base para la aparición de las primeras células.

La copia del ARN en el mundo del ARN

Uno de los requerimientos para la existencia de un mundo basado en el ARN es la presencia de una ribozima que, además de copiar otras moléculas de ARN, fuera capaz de catalizar su propia replicación, algo necesario para mantener la capacidad de las moléculas para ser copiadas a lo largo del tiempo. Sin embargo, las ribozimas que se han encontrado hasta ahora solo son capaces de catalizar la copia de cadenas cortas de otros ARNs, pero no de ellas mismas.

¿Hay alguna alternativa no enzimática a la copia del ARN? Actualmente se están ensayando vías basadas en la química de la complementariedad entre las bases. La idea es que podría haber cadenas cortas de ARN inmersas en un ambiente rico en nucleótidos. Estos nucleótidos encontrarían sus complementarios y se aparearían con ellos, enlazándose juntos en un paso posterior. Este procedimiento de copia es muy fácil de imaginar, pero difícil de demostrar. Gran parte de lo que sabemos sobre él se lo debemos a las investigaciones pioneras de Leslie Orgel, seguidas después por Gerald Joyce y Jack Szostack. La gran contribución de Orgel a este tema fue el reconocer que los nucleótidos que utiliza la célula actual, los nucleótidos trifosfato, son excelentes para la copia del ARN en presencia de enzimas específicas. Sin embargo, sin esas enzimas, los mismos nucleótidos no hacen nada, son incapaces de unirse entre ellos y finalmente se hidrolizan. Parece, por tanto, que los nucleótidos trifosfato no podían ser los sustratos utilizados para copiar el ARN en la Tierra primitiva. Sin embargo, Orgel descubrió que si dos de los fosfatos de los nucleótidos eran reemplazados por otro grupo químico, la reacción de copia de ARN a partir de un molde, en ausencia de enzimas, iba mucho mejor. Los moldes que pueden ser copiados son cortos, pero el camino para conseguir

copiar secuencias más largas está abierto. Y es que con solo veinte o treinta nucleótidos se pueden conseguir buenas ribozimas que podrían comenzar procesos evolutivos que culminarían en la aparición de metabolismos muy simples. Lo que necesitamos saber ahora es cómo todo eso podría ser encerrado en un compartimento, de modo que información y metabolismo pudieran acoplarse entre ellos. Es decir, necesitamos saber cómo surgieron las primeras protocélulas.

El origen y evolución de las protocélulas

Las membranas que rodean las células actuales están formadas por una bicapa lipídica, compuesta mayoritariamente por fosfolípidos y otras moléculas como colesterol y glúcidos. En la bicapa, además, se insertan proteínas que forman sofisticados canales a través de los cuales se realiza el transporte de moléculas cargadas o de gran tamaño. Es muy difícil pensar que las membranas primitivas fueran tan complejas. Sin embargo, todos hemos visto que si mezclamos un poco de aceite con agua y lo agitamos, se forman diminutas gotitas, debido a que los ácidos grasos (que son uno de los componentes de los fosfolípidos más complejos) se disponen de forma tal que protegen sus partes apolares del contacto con el agua. Bajo determinadas circunstancias, en lugar de micelas, pueden formarse vesículas delimitadas por bicapas de ácidos grasos, y esto ya se parece mucho más, al menos en su forma, a lo que podría ser una célula primitiva.

El paso siguiente sería que las vesículas incluyeran varias ribozimas que pudieran llevar a cabo un metabolismo primitivo, que podría no ser más complicado que la copia de esas mismas ribozimas. Para que eso sea posible, es necesario que las membranas de las vesículas puedan ser atravesadas por los sustratos de ese metabolismo, en este caso los nucleótidos, algo que ha podido ser demostrado en el laboratorio de Szostack. Esto todavía no es vida, pero muestra uno de los caminos posibles hacia la aparición de las primeras protocélulas, capaces de copiar moléculas de ARN en un compartimento.

Para que las protocélulas comiencen a reproducirse es necesario que sean capaces de crecer y, a continuación, dividirse en dos o más células hijas equivalentes. El proceso de crecimiento ha sido demostrado en los laboratorios de Pier Luigi Luisi y otros investigadores, simplemente añadiendo nuevos ácidos grasos al agua en el que estaban inmersas las vesículas ya formadas.

Hasta ahora hemos conseguido formar pequeñas vesículas de agua y ARN rodeadas por una membrana que son capaces de crecer absorbiendo moléculas del ambiente y, finalmente, dividirse. Estas vesículas también podrían competir entre ellas por la incorporación de ácidos grasos del ambiente, de modo que las que mejor los

incorporen den lugar a un mayor número de nuevas vesículas al dividirse. Pero esto todavía no es vida y tampoco se puede decir que ese proceso de competición entre vesículas sea el punto de partida para que la selección natural comience a actuar. Para que eso suceda, la división de las vesículas debe acoplarse a la replicación de las moléculas de ARN que están en su interior y, además, alguna de esas moléculas debe aportar una ventaja a la protocélula que la contiene. Mantener esa molécula podría ser suficiente para iniciar un camino evolutivo que llevara a la aparición de las primeras células.

Es ilógico pensar en la existencia de un mundo compuesto exclusivamente por ARN. Probablemente la realidad era más diversa, con protocélulas englobando otros muchos tipos de moléculas: pequeños péptidos, moléculas cortas de ADN, aminoácidos, nucleótidos, fragmentos de arcillas, etc. Quizás la eficacia de la catálisis pudo mejorarse por la adición de algunos aminoácidos a las moléculas de ARN y esto podría haber sido la base de un código genético primitivo. En algún momento podrían haber aparecido péptidos capaces de llevar a cabo reacciones catalíticas con mayor eficiencia, todo lo cual probablemente fue abriendo el camino para la separación de las funciones del almacenamiento de información y la catálisis en dos moléculas diferentes: el ADN y las proteínas.

Escenarios para la replicación del ARN y la división de las protocélulas en la Tierra primitiva

¿Cuáles serían los escenarios más plausibles en la Tierra primitiva que permitirían la existencia estable de ese tipo de vesículas lipídicas con material genético en su interior? Una posibilidad es que la vida empezara en lugares donde los compuestos orgánicos pudieran acumularse en elevada concentración, preferentemente formando depósitos cristalinos de los que, dadas las condiciones adecuadas, pudieran liberarse para participar en nuevas reacciones. Esta necesidad de concentración de los compuestos posiblemente excluye a los océanos como el lugar donde se originó la vida, debido a que las partículas que cayeran en ellos resultarían diluidas inmediatamente y sería muy difícil que pudieran reaccionar entre ellas. Los pequeños lagos o charcos parecen más adecuados en este sentido.

Si la vida comenzó con el ARN, no parece muy razonable pensar que los primeros procesos tuvieran lugar a temperaturas muy elevadas, debido a la baja estabilidad de esta molécula en esas condiciones. Pero, por otro lado, la copia del ARN requiere aumentos de temperatura lo suficientemente elevados como para que la molécula se desnaturalice y se eliminen temporalmente los puentes de hidrógeno internos que mantienen unidas sus bases, permitiendo así su copia. Teniendo en cuenta

todo esto, quizás el ambiente más adecuado para el origen de la vida sería un lugar que estuviera frío la mayor parte del tiempo, pero que experimentara aumentos de temperatura ocasionales. Las áreas geotermales proporcionan uno de estos ambientes en los que las temperaturas pueden fluctuar en la forma adecuada para permitir la copia del ARN sin causar su degradación.

Las aproximaciones *bottom up* y *top-down* al origen de la vida

Como acabamos de describir, existen muchos laboratorios en los que se trabaja para intentar ver cómo es posible la síntesis de los monómeros que forman parte de la vida (aminoácidos, azúcares, nucleótidos o lípidos sencillos) en condiciones abióticas compatibles con las que pudieron existir en la Tierra primitiva. El paso siguiente en este tipo de aproximación al origen de la vida (de abajo-arriba o desde lo más simple a lo más complejo), que se suele denominar por su nomenclatura en inglés o *bottom-up*, sería la polimerización de los monómeros hasta formar macromoléculas del tipo de los ácidos nucleicos, las proteínas, los polisacáridos o los lípidos complejos. A continuación (o simultáneamente a su polimerización), todos estos componentes se integrarían en un compartimento, de modo que el conjunto fuera capaz de replicarse y evolucionar por selección natural. Cuando llegáramos a este punto podríamos decir que hemos llegado al origen de la vida y, a partir de él, la evolución darwiniana sería la encargada de ir seleccionando estructuras y funciones de mayor complejidad hasta llegar a LUCA, que ya se parecería mucho a las células que conocemos. ¿Cuántos intentos infructuosos han podido tener lugar hasta llegar a esa célula primitiva? No lo sabemos, pero parece claro que los procesos que hemos descrito no tendrían por qué ser exclusivos de un único lugar de nuestro planeta. Incluso en un mismo entorno podrían coexistir diferentes tipos de protocélulas, hasta que todas ellas excepto las de un tipo fueran eliminadas por la superioridad evolutiva de aquella que conduciría a LUCA. La eliminación de algunas líneas evolutivas de protocélulas también podría haber sido debida a algún accidente físico que causara su destrucción, como por ejemplo la desecación del lugar donde se reproducían. Todo ello, selección natural y circunstancias ambientales, han conducido a la persistencia de un único linaje, el de LUCA, que no tendría por qué ser ni el más evolucionado ni el que presentara características más ventajosas.

La aproximación *bottom up* también se conoce como biología sintética, ya que en cierto sentido intenta recrear vida en el laboratorio, partiendo de la materia inanimada hasta llegar a formar estructuras que posean todas las propiedades de la vida. Algo muy interesante de esta aproximación es que las posibles formas de vida que consiguiéramos crear no tendrían por qué ser iguales a las que actualmente

existen en la Tierra. Representarían un camino hacia el origen de la vida, pero mostrarían que el que conocemos no es el único posible. Más aún, variando las condiciones ambientales en las que los bloques de la vida se forman y se ensamblan podría estudiarse qué procesos pueden conducir al origen de la vida en otros planetas.

La otra aproximación al origen de la vida es la conocida como de arriba-abajo o *top-down*. Esta consiste en la comparación de las características, sobre todo los genomas y metabolismos de los seres vivos actuales, o algunos ya extinguidos de los que podemos recuperar fósiles, para, a partir de las características que comparten, inferir qué genes estaban ya presentes en LUCA. Evidentemente puede que haya genes que se hayan perdido a lo largo de la evolución, bien porque eran esenciales en las condiciones de la Tierra primitiva pero han dejado de serlo en las de la Tierra actual, bien porque sus funciones han sido suplidas por otros genes que han surgido posteriormente. Dentro de esta aproximación, una línea muy interesante consiste en la comparación de los genomas de las bacterias con un número muy reducido de genes, algunas de las cuales viven en simbiosis en el interior de células especializadas de algunas familias de insectos. Este tipo de asociación consiste en que las bacterias sintetizan productos esenciales para el insecto y, a cambio, el insecto suministra otros a las bacterias, las cuales acaban perdiendo los genes que no necesitan dentro del hábitat favorable y estable suministrado por el insecto. A pesar de esta pérdida de genes, algunas de estas bacterias endosimbióticas aún conservan su estatus de organismo, lo que las convierte en un objeto de estudio muy interesante para determinar cuál es el genoma mínimo de la vida.

Debido a la tectónica de placas de la que ya hemos hablado es imposible que encontremos restos de LUCA. Aun así, parece claro que era una especie unicelular, sin núcleo, similar a las bacterias actuales. Fue el resultado de un linaje de protocélulas que consiguieron combinar con éxito las cuatro propiedades esenciales de la vida: información almacenada en el material genético –no sabemos si en forma de ADN o ARN-, metabolismo transformador de energía –bien de la energía luminosa, bien de la obtenida a partir de reacciones entre compuestos químicos presentes en las rocas-, compartimento definido por una membrana lipídica de mayor o menor complejidad y, por último, capacidad para evolucionar a través de la acción combinada de la copia con error de su material genético y la selección natural.

Las grandes transiciones evolutivas

Cuando se examina la historia de la vida, parece indudable que a lo largo de la evolución existe una tendencia hacia el aumento de la complejidad: la célula eucariótica es más compleja que la procariótica, las plantas y los animales son más complejos que las bacterias, etc. ¿Cómo y por qué se han producido estos aumentos de complejidad? Eörs Szathmáry y John Maynard Smith en su libro "Las grandes transiciones evolutivas" publicado en el año 1995 señalan ocho grandes transiciones evolutivas que abarcan desde la etapa anterior al origen de las primeras células –el mundo del ARN del que hemos hablado antes- hasta el nacimiento de las sociedades humanas. Estas transiciones son las siguientes:

1. Las moléculas con capacidad replicativa que precedieron a la vida celular se organizan en compartimentos que contienen diferentes combinaciones de replicadores.
2. Las moléculas de replicadores se unen entre sí para dar lugar a moléculas de mayor tamaño, que posteriormente pasarían a constituir los cromosomas.
3. Aparecen las primeras células procarióticas.
4. Los eventos de simbiosis entre distintos tipos celulares conducen a la aparición de las células eucarióticas.
5. Surge un nuevo tipo de reproducción, la reproducción sexual, que implica la mezcla del material genético de dos organismos diferentes.
6. Aparece la multicelularidad, un evento asociado a la especialización celular y la división del trabajo.
7. Surgen sociedades de animales en las que diferentes formas de aprendizaje, normalmente mediadas por gestos y señales, favorecen la colaboración entre sus individuos.
8. Los seres humanos se organizan en sociedades, de mucha mayor complejidad que las constituidas por otros animales. El lenguaje humano resulta de vital importancia en esta transición y también para que las sociedades humanas continúen evolucionando en la forma que lo hacen.

Las condiciones para que la vida pueda surgir en otros lugares del Universo

A la hora de considerar si un planeta es habitable o no, la mayoría de los científicos consideran tres requisitos fundamentales: existencia de fuentes de energía, presencia de elementos químicos que puedan ser utilizados para construir las complejas moléculas que forman parte de los seres vivos y disponibilidad de un solvente que permita realizar las reacciones químicas asociadas a la vida.

En la Tierra las fuentes de energía primaria utilizadas por la vida son la luz solar y la energía desprendida en algunas reacciones químicas inorgánicas que tienen lugar en el ambiente. Los seres vivos autótrofos poseen sistemas capaces de transformar esa energía externa, que no puede ser utilizada directamente en las reacciones metabólicas, en energía aprovechable para realizar sus propias funciones. A veces se dice que toda la vida de la Tierra depende de la luz solar y no es cierto, dada la existencia de microorganismos capaces de acoplar su metabolismo a reacciones químicas que ocurren fuera de ellos. Parte de las bacterias que realizan este proceso viven en el fondo de los océanos, en las cercanías de las fuentes hidrotermales submarinas, donde no llega la luz del Sol. El agua a más de 100 °C que emerge del fondo del océano en esos lugares disuelve minerales de las rocas, favoreciendo el desarrollo de reacciones químicas en las que se desprende energía que puede ser utilizada por diversas especies de bacterias. Así se inicia una cadena trófica que da lugar a un ecosistema completamente independiente de la energía solar.

Respecto a los elementos químicos que forman parte de la materia viva, en la vida terrestre el elemento fundamental es el carbono que, al formar enlaces con otros como el hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, fósforo o azufre, puede dar lugar a una gran variedad de moléculas conteniendo grupos funcionales con capacidad para intervenir en reacciones químicas. De este modo, la química del carbono facilita, no solo la realización del metabolismo, sino también el ensamblaje de macromoléculas y estructuras complejas como las que forman parte de la vida.

Por último, toda la vida terrestre utiliza agua como solvente, siendo este un requisito fundamental para la vida que conocemos. Hay muchas razones por las que la vida en la Tierra ha evolucionado para utilizar el agua como solvente. Entre ellas podemos citar: su abundancia en nuestro planeta, el hecho de que sea un compuesto polar con capacidad para disolver muchas moléculas y su facilidad para formar puentes de hidrógeno. El agua, además, es un excelente termorregulador, algo muy necesario para que la vida mantenga cierta estabilidad frente a las fluctuaciones de temperatura que ocurren en el ambiente. Es tal la importancia del agua para la vida terrestre que gran parte de la investigación orientada a identificar los ambientes extraterrestres en los que podría haber vida está dirigida a la búsqueda de agua líquida.

Además de estos tres requisitos fundamentales, existen otros factores ambientales (como la temperatura, la presión, el pH, la radiación o la presencia de moléculas tóxicas) que también pueden condicionar si la vida puede existir. Los valores de algunas de esas variables se solían utilizar hace algunos años para definir la zona

de habitabilidad de una estrella, es decir, la región alrededor de la misma en la cual podrían existir planetas capaces de sustentar vida. Sin embargo, como ya hemos visto, la propia vida terrestre posee una gran capacidad para adaptarse a los valores extremos de muchas de esas condiciones, de modo que, no solo es capaz de sobrevivir en esas circunstancias, sino que, en ocasiones, ha hecho de ellas un requisito imprescindible para su existencia.

Los lugares de nuestro Sistema Solar donde es más probable que se cumplan los requisitos que hemos mencionado son: Marte, la luna helada de Júpiter (Europa) y dos de los satélites de Saturno (Encélado y Titán). Actualmente se están realizando numerosas investigaciones para determinar si en alguno de ellos podría haber surgido la vida. Aunque la vida que podríamos encontrar en estos lugares sería, casi con total seguridad, microscópica, el hallazgo tendría una importancia crucial. No olvidemos que descubrir vida en otro lugar del Universo, y su comparación con las características de la vida terrestre, nos permitiría por fin saber qué es lo que define la vida, cuáles son sus características esenciales y también comenzar a descubrir las posibles formas en las que estas pueden manifestarse.

Posibles temas para reflexionar y/o para realizar los trabajos

¿Cómo sería el metabolismo de los primeros seres vivos?

El reto de rebatir la teoría de la generación espontánea

La teoría de la panspermia. Desde los filósofos griegos hasta la síntesis de materia orgánica en el polvo interestelar

A la luz de lo que sabemos actualmente, ¿la vida podría haber surgido en otros lugares del Universo?

Aproximaciones para la síntesis de las moléculas precursoras de la vida

¿Cómo sería LUCA?

¿Qué fuerza ha permitido la aparición de la vida? ¿Qué función representa la vida en la evolución del Universo?

Las dificultades para encontrar una definición de vida

La evolución en el mundo del ARN

Bibliografía

Gran parte de esta guía didáctica ha sido preparada a partir del libro: "La vida. Un viaje hacia la complejidad en el Universo" Ester Lázaro. Editorial Sicomoro (2019). ISBN 8494651463.

Bibliografía adicional

Libros

Orígenes. El universo, la vida, los humanos. José María Bermúdez de Castro, Carlos Briones Llorente, Alberto Fernández Soto. Editorial Crítica (2015). ISBN 8498928621

Siete pistas sobre el origen de la vida: Una historia científica en clave detectivesca. A. G. Cairns-Smith. Editorial Grupo Anaya Publicaciones Generales (2013). ISBN 8420674443

Artículos científicos

Bada J L and Lazcano A (2003). Prebiotic soup: Revisiting the Miller experiment. *Science* 300:745–746.

Benner SA (2010) Defining life. *Astrobiology* 10:1021-1030.

Ricardo A and Szostak JW (2009) Life on Earth. *Scientific American*, September: 54-62.

Internet

https://elpais.com/elpais/2017/05/26/ciencia/1495815679_705731.html

<https://metode.es/revistas-metode/monograficos/el-mundo-del-arn.html>

<https://metode.es/revistas-metode/monograficos/reflexiones-sobre-el-origen-de-la-vida.html>

<https://metode.es/revistas-metode/monograficos/uno-de-los-experimentos-mas-importantes-del-siglo-xx.html>

<https://www.microsiervos.com/archivo/ciencia/sentido-de-la-vida-relacion-entropia.html>

<https://metode.es/revistas-metode/secciones/natural-ment-seccions-revistas/evolucion-cooperacion-historia-vida-este-planeta.html>

<https://culturacientifica.com/2014/01/31/la-hipotesis-de-la-panspermia-supera-un-nuevo-test/>

<https://es.khanacademy.org/science/biology/history-of-life-on-earth>