

Astrobiología: origen y evolución de la vida.

Vassilissa Vinogradoff¹, Beatriz García², Rosa M. Ros³

1. CNRS, Aix-Marseille Université, PIIM laboratory, Marseille, France.

2. ITeDA and National Technological University, Argentina

3. Polytechnical University of Catalonia

Resumen

La Astrobiología no es una disciplina sino una actividad interdisciplinaria en torno a la cuestión del origen y evolución de la vida en la Tierra y su posible presencia en otras partes del Universo. La Astrobiología abarca todos los campos interesados en esta cuestión, desde la astronomía hasta la biología, pasando por la geología y la química, pero también la historia y la filosofía de la ciencia. Los objetivos son múltiples e incluyen en particular: definir la vida, determinar su origen, buscar sus huellas más antiguas, comprender sus mecanismos de evolución en la Tierra pero también buscar la vida en el universo. A través de esta investigación, la Astrobiología intenta determinar si podría existir vida en otras partes del universo y, de ser así, en qué forma, para intentar responder a una pregunta existencial: ¿estamos solos en el universo? Durante varias décadas, ha quedado claro que comprender la aparición de la vida en la Tierra es crucial para determinar si se trata de una coincidencia o de un fenómeno reproducible en condiciones y entornos específicos. Esta comprensión es necesaria para sacar conclusiones sobre la posibilidad de que haya vida en otras partes del universo. A pesar de los esfuerzos activos, aún no se ha llegado a tales conclusiones. Estas preguntas han surgido con el desarrollo de la química orgánica a partir del siglo XIX, la exploración espacial en el siglo XX (a partir de 1969 con las misiones Apolo) y la búsqueda humana de encontrar vida en otros lugares (ejemplo de las misiones marcianas). La Astrobiología se refería entonces a la investigación y estudio de la vida fuera de nuestro planeta. Ahora y después de grandes avances en el tema desde los años 1990, este término reúne todo lo relacionado con la cuestión del origen y evolución de la Vida en la Tierra o en otras partes del Universo.

Definición sintética de Astrobiología

La Astrobiología se ocupa de la búsqueda de los orígenes y la evolución de la vida en la Tierra y de su posible presencia en otras partes del Universo. Este vasto campo reúne investigaciones interdisciplinarias sobre, por ejemplo, las huellas de vida antigua en la Tierra a partir del análisis de las rocas más antiguas; las condiciones fisicoquímicas en las que se encontraba la Tierra primitiva hace 4.500-4.000 millones de años cuando apareció la vida; la diversidad de materia orgánica disponible en estos ambientes, que habría llevado al desarrollo de la química prebiótica; la transición de lo abiótico a lo biótico con el surgimiento de sistemas químicos seleccionados para formar un sistema vivo; la evolución de las primeras

entidades de la Tierra hasta nuestro último ancestro común universal (LUCA), incluyendo el estudio de organismos extremófilos como las Archaeobacteria; la búsqueda de vida en otros lugares mediante misiones espaciales en el sistema solar, en exoplanetas y en el Universo en general; y finalmente sobre la definición de la vida misma y sus implicaciones filosóficas. Por tanto, es necesaria una interacción profunda e interdisciplinaria entre las diferentes disciplinas de la física, química, biología, geología, bioquímica, planetología, informática, filosofía y epistemología para el desarrollo y avance de la Exobiología. Aunque cada investigador se especializa en una disciplina específica, hoy en día es fundamental prestar atención a otras disciplinas y a los avances producidos en otros campos de la investigación a la hora de comprender la cuestión de los Orígenes de la vida y hablar de Astrobiología.

Historia de la pregunta sobre el origen de la vida

Sorprendentemente, la cuestión del Origen de la vida no es una pregunta que el hombre se haya estado planteando desde el principio de los tiempos. De hecho, hasta principios del siglo XIX, era comúnmente aceptada la teoría de la generación espontánea, que describía que la vida puede aparecer espontáneamente en cualquier medio. Esta teoría, adoptada por muchos grandes científicos de la época, fue incluso validada por experimentos como el de Jean-Baptiste Van Helmont descrito en varias obras de 1648. Los experimentos demostraron que era posible ver la “apariencia” de un ratón en un tarro lleno de harina de trigo, sellado por una camisa de mujer (sucia), colocado en la parte trasera de un sótano en la oscuridad (las variantes hablan de mantas y otras sábanas sucias). Estos experimentos y la teoría de la generación espontánea se mantuvieron vigentes hasta principios del siglo XIX.

Fue necesario esperar el desarrollo de la química orgánica y los primeros síntesis de moléculas para demostrar que los compuestos orgánicos siguen las mismas leyes que los compuestos inorgánicos y, por lo tanto, no estaban necesariamente vinculados a organismos vivos. Una de las primeras síntesis memorables fue la realizada por Friedrich Wöhler en 1828, quien sintetizó con éxito la urea, una molécula identificada en el hígado de los animales y considerada sólo de origen biológico por químicos como Jöns Jacob Berzelius. Paralelamente, Charles Darwin (1809-1882), naturalista y paleontólogo inglés, realizó, durante varios años, observaciones y trabajos sobre especies que revolucionarían nuestra visión de la evolución de los seres vivos. En 1859 publicó la primera edición de su libro "Los orígenes de las especies". Aunque en su obra no se trata del origen de la vida, la teoría de la evolución hace la noción de que todas las especies vivientes derivan y proceden de un ancestro común. Cae el postulado: todos estamos vinculados a un ancestro común, cuya forma de vida es mucho más sencilla que nuestra vida actual.

Por tanto, el origen de la vida se remonta a un pasado lejano, pero la teoría de la generación espontánea permanece para estos primeros seres vivos. Unos años más tarde (1861), fue Louis Pasteur, ferviente oponente de la teoría de la generación espontánea y obsesionado por los microorganismos, quien dio el golpe final. Demuestra con su experimento del “cuello de cisne” que cuando el aire y el ambiente se esterilizan adecuadamente no se observa producción de microbios. A partir de ese momento, se abandona paulatinamente la teoría de la generación espontánea.

A finales del siglo XIX, la ciencia se encontraba en un punto muerto: por un lado, Charles Darwin propuso que todas las especies tienen un origen común y, por otro, Louis Pasteur demostró que la generación espontánea no existe. Algunos grandes científicos de la época como Berzelius o Lord Kelvins propusieron entonces que la vida existe en todas partes del universo y que procedía de otro lugar. Podría haber llegado a la Tierra mediante esporas contenidas en meteoritos o cometas. Esta es la teoría de la panspermia. Cabe señalar que hasta el momento no se ha encontrado ningún rastro de vida, bacterias u otras esporas en estos objetos extraterrestres, sólo moléculas orgánicas. Sin embargo, esta teoría (todavía apoyada y modelada por algunos científicos hoy en día) persiste y fue considerada la única explicación plausible durante casi un siglo. En 1924, Alexander Oparin presentó nuevas hipótesis sobre el origen de la vida en su libro.

Siguiendo los trabajos de los químicos del siglo XIX, que refutaban cada vez más el límite entre lo inorgánico (el mineral) y lo orgánico sintetizando en el laboratorio moléculas como los azúcares o los aminoácidos, Alexander Oparin propuso una continuidad entre ambos. En su libro describió que la materia podría haber evolucionado en nuestros océanos, siguiendo las leyes de la física y la química, transformando compuestos simples en moléculas más complejas que, en la "sopa primitiva", formarían luego agregados de materia y, por complejización, conducirían a la producción de células. Este concepto también lo propone un genetista británico, J.B.S Haldane, al mismo tiempo y de forma independiente. Aunque atractiva, esta hipótesis sobre el origen de la vida aún está por confirmar.

Etimología: Exobiología y Astrobiología

Desde principios de los años 1960 se inició la disputa espacial, y con ella las primeras misiones de exploración lunar y marciana. El riesgo de contaminación biológica aparece en el lenguaje tanto en el sentido de transportar microbios terrestres a otras estrellas como de traer vida extraterrestre de regreso a la Tierra. Joshua Lederberg, microbiólogo y genetista (Premio Nobel de Medicina 1958) siguió de cerca la cuestión de la contaminación y permitió aplicar protocolos estrictos para la descontaminación de las naves espaciales. La NASA ha pedido a Joshua Lederberg que desarrolle protocolos de análisis bioquímicos para muestras lunares y marcianas, teniendo en cuenta nuestra propia contaminación. Cabe señalar que en la década de 1960, los científicos suponían que era poco probable que los microbios resistieran las condiciones del espacio. Hoy sabemos que no es así y, por ejemplo, los tardígrados, una especie sorprendente que vive en la Tierra, son capaces de resistir condiciones extremas, incluidas las del espacio. El caso de los tardígrados no es aislado y otras especies vivas como las bacterias también pueden ser resistentes a un ambiente extremo.

Joshua Lederberg, partidario de la teoría de la panspermia, creó el término Exobiología en 1960, durante una presentación científica ante el COSPAR (Comité de Investigaciones Espaciales). Sentó las bases de esta nueva ciencia, definida como la búsqueda de vida en otros lugares. La floreciente alianza de exploración espacial de aquella época, a partir del libro de Alexander Ivanovich Oparin sobre la cuestión del origen de la vida y la experiencia pionera de Miller-Urey en el campo de la química prebiótica, hacen de la Exobiología la nueva

disciplina clave para la búsqueda del origen de la vida a través del espacio. exploración. Joshua Lederberg, junto con el astrónomo Carl Sagan y el físico Elliott Levinthal, estaba interesado en el potencial de contaminación marciana. Todos formarán parte de los equipos científicos de las misiones Viking, que alunizaron y estudiaron Marte desde 1976. Convencidas de la presencia de vida en Marte, estas misiones debían confirmar su presencia. Estos experimentos de exobiología a bordo contribuyeron a los primeros desarrollos de experimentos in situ en objetos del sistema solar.

Al mismo tiempo, se crea una comunidad de investigadores en torno a la cuestión del origen de la vida, con científicos que, a partir de los años 1950, iniciaron estudios químicos para la síntesis de las primeras moléculas prebióticas (ver el experimento Miller-Urey, Figura 1). . En 1973 se fundó una sociedad internacional que reúne diferentes disciplinas sobre estas cuestiones del origen de la vida, ISSOL (Sociedad Internacional para el Estudio del Origen de la vida: <https://issol.org>).

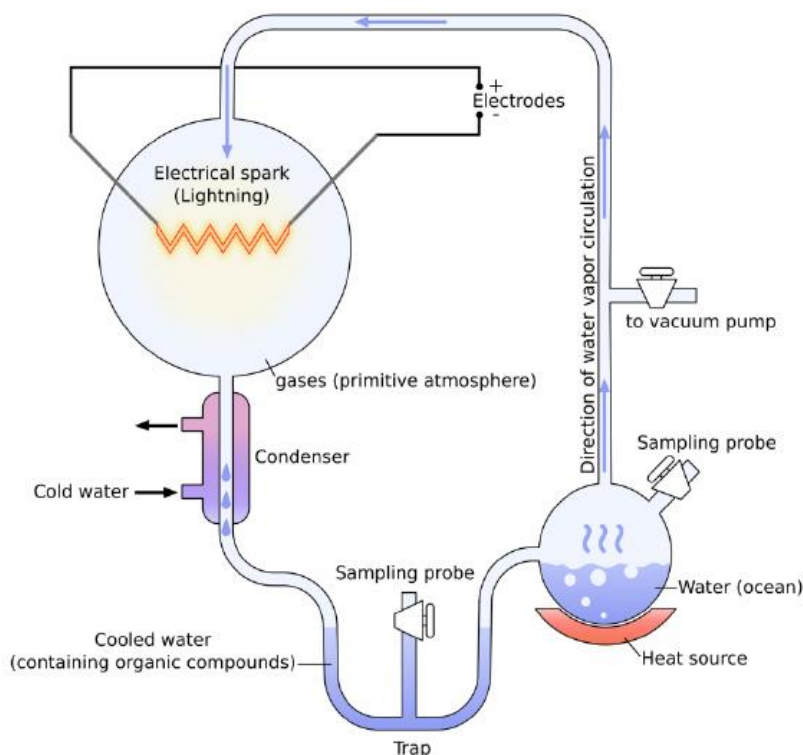


Fig. 1 Ilustración del experimento Miller-Urey para simular el entorno primitivo de la Tierra y la formación de moléculas orgánicas complejas en los océanos (Crédito: La Barre, Stéphane. (2014). Biodiversidad marina y quimiodiversidad: los tesoros del futuro.)

En 1982, la Unión Astronómica Internacional (IAU) creó la comisión “Bioastronomía: Búsqueda de vida extraterrestre”, rebautizada simplemente como Bioastronomía en 2006 y luego “Astrobiología” en 2015¹. ISSOL y la comisión IAU-Astrobiología siguen activas y organizan periódicamente conferencias internacionales que reúnen a investigadores que trabajan sobre la cuestión de los orígenes y evolución de la vida, así como su presencia en

¹ https://www.iau.org/science/scientific_bodies/commissions/F3/

otras partes del Universo. Muchas sociedades nacionales de exobiología o astrobiología se han creado posteriormente en diferentes países (Francia, Alemania, Inglaterra).

La diferencia entre los términos Exobiología, Bioastronomía y Astrobiología es ahora histórica y debería usarse para una misma definición: la búsqueda del origen, evolución y distribución de la vida en el universo (incluida la Tierra).

Definir la Vida

Dar una definición de la vida, o al menos de los seres vivos, es uno de los retos más complicados de la Astrobiología. Con el paso de los años y los descubrimientos, descubrimos que lo vivo es tan complejo, que es muy difícil dar la definición más completa. Esta pregunta requiere argumentos científicos pero también es un cuestionamiento filosófico que hace que cualquier definición sea relativamente no objetiva y orientada según el campo científico del autor.

Con el tiempo, diferentes personalidades y científicos han propuesto definiciones de la vida. Uno de los más antiguos se remonta a Aristóteles (~300 a.C.) y era bastante básico: “Por vida entendemos alimentarse, crecer y consumirse por sí misma”. Dado que el origen de la vida no tuvo interés durante siglos, su definición siguió siendo muy objetiva. El advenimiento de la ciencia y los grandes descubrimientos en química y biología orgánicas a partir del siglo XVII trajeron nuevos elementos y surgió la cuestión de la definición de vida. Una de las definiciones más utilizadas hoy en día es fruto del grupo de trabajo del programa de Exobiología de la NASA en 1995, del que Gerald Joyce era miembro y al que se suele atribuir esta definición debido a sus propios trabajos científicos sobre sistemas autorreplicantes: “La vida es un sistema químico autosostenible capaz de sufrir una evolución darwiniana”.

Durante los estudios sobre la definición de organismos vivos, nos damos cuenta de que cada definición es el punto de vista del científico en relación con su propio conocimiento y campo científico y que eventualmente sería necesario combinar todas estas definiciones para acercarse mejor a una definición.

Diversidad de seres vivos y búsqueda de los rastros de vida más antiguos en la Tierra

El único ejemplo conocido de vida, es la vida terrestre, la Astrobiología concentra gran parte de sus esfuerzos en estudiar la vida terrestre en todos los entornos, especialmente en los más extremos, como los manantiales hidrotermales submarinos, los lagos de salmuera o los lugares helados. Este tipo de entorno puede ser un buen análogo de las ubicaciones extraterrestres. Para comprender mejor los límites de los organismos vivos y los mecanismos que actúan en ambientes extremos, los científicos buscan determinar la diversidad filogenética y metabólica de los organismos vivos.

Una de las ramas del árbol de la vida (Fig. 2) que resulta de especial interés son las arqueobacterias (o archaea), distintas de las bacterias procarióticas por su secuencia de ARN ribosomal y particularmente adaptadas a ambientes extremos (en términos de presión, temperatura, salinidad, nutrientes, etc). La especificidad de las arqueobacterias salió a la luz tarde, en 1977, cuando se descubrieron bacterias en fuentes hidrotermales, gracias a técnicas analíticas avanzadas (secuenciación de ARN). Las arqueas forman así un tercer grupo de seres vivos en la Tierra cuyo estudio proporciona información esencial para comprender los límites de la vida en la Tierra y la búsqueda de nuestros orígenes. Los avances en metagenómica permitieron, por ejemplo, aislar en 2015 un nuevo grupo de arqueas, denominadas arqueas de Asgard, que se proponen como potenciales ancestros directos de los eucariotas. Este tipo de organismo es un objetivo primordial para estudiar posibles formas de vida en otros lugares, en entornos como Venus, Marte o incluso los satélites helados alrededor de Júpiter y Saturno que tienen un océano bajo su superficie.

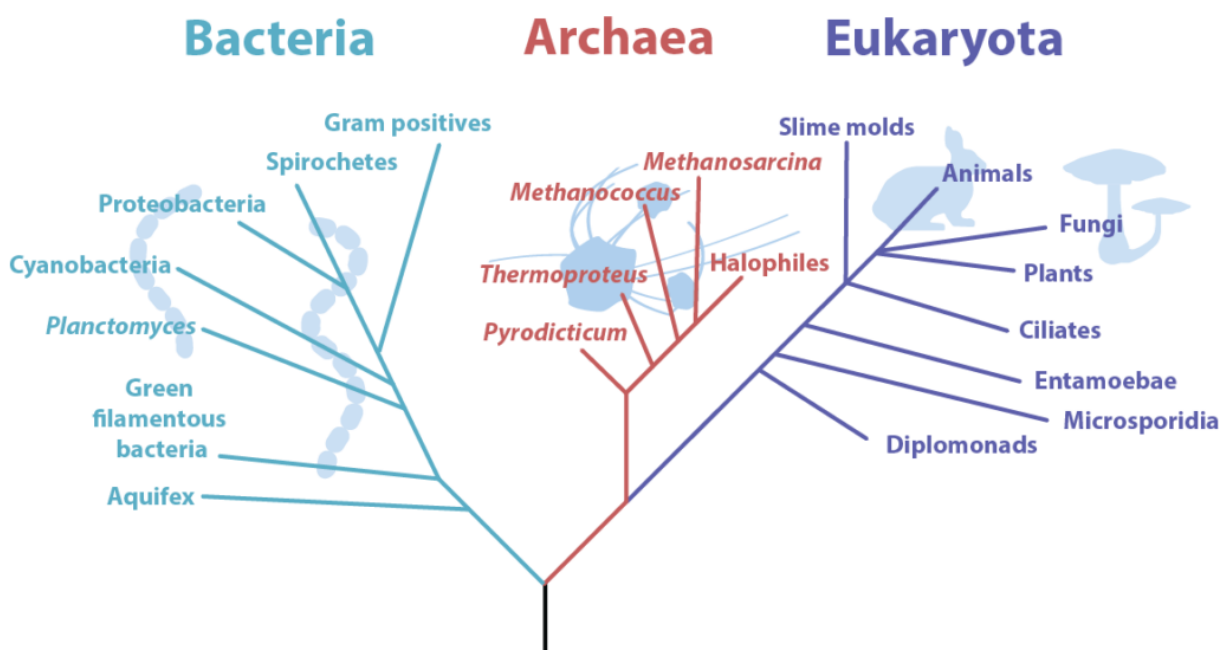


Fig. 2 Árbol filogenético simplificado de organismos vivos, que representa los tres grupos de organismos vivos: los eucariotas de los que formamos parte, las bacterias que son procariotas uni o multicelulares y las arqueas que son microorganismos unicelulares separados de las bacterias (Crédito: <https://open.oregonstate.edu/generalmicrobiology/chapter/archaea/>)

Sin embargo, los procariotas de la Tierra han tenido miles de millones de años para evolucionar, adaptarse a su entorno y poner en marcha sistemas bioquímicos capaces de soportar, por ejemplo, presiones o temperaturas extremas. Cabe señalar también que en la Tierra, se necesitaron alrededor de 1.500 millones de años para que microorganismos como bacterias o arqueas colonizaran los océanos y produjeran suficiente oxígeno, que luego se evaporó a la atmósfera y permitió el desarrollo de organismos que utilizaban el oxígeno como fuente de energía. A menos que se produzca la misma evolución en otro planeta en las mismas condiciones y con las mismas contingencias terrestres (por ejemplo en términos de meteorología, tectónica de placas, etc.), es casi improbable encontrar estas mismas entidades

fuera de la Tierra. Pero el estudio de los extremófilos abre el campo de posibilidades de vida en entornos a priori inadecuados.

La búsqueda de los rastros de vida más antiguos en la Tierra es uno de los ejes de la investigación en Astrobiología, que podría permitir llenar los vacíos sobre nuestros antepasados. Estos estudios encuentran muchas dificultades debido a la difícil preservación de los fósiles a lo largo del tiempo geológico.

La primera dificultad es que la Tierra es un planeta "vivo" (tectónica, erosión) y, por tanto, ha evolucionado mucho desde su formación hace 4.500 millones de años. Cualquier roca que data de la primera era geológica, el Hadeano, ya no se encuentra en la Tierra, excepto el mineral llamado circón. Por lo tanto, la búsqueda de fósiles se centra en el período posterior a 4 mil millones de años, en la era Arcaica (4-2,5 mil millones), de la cual todavía quedan rocas sedimentarias en la Tierra, pero que, sin embargo, han evolucionado. Un fósil puede tomar diferentes formas, o es posible encontrar restos o huellas de plantas o animales (conchas, huellas), o si la estructura del fósil ya no existe, es posible identificar firmas físicas (estructurales) o químicas (en particular las proporciones isotópicas del carbono). En cualquier caso, ahora se sabe, basándose en la genealogía de las especies, que los primeros organismos vivos debieron ser seres unicelulares parecidos a bacterias

Así, la segunda dificultad en la búsqueda de rastros de vida antigua es que estos organismos tenían que ser microscópicos. Los rastros más antiguos probados de vida en la Tierra datan de 3.480 millones de años y fueron descubiertos en Australia. Estos son estromatolitos (concreción calcárea formada por filamentos bacterianos), cuya forma indica que existían bacterias, sin que éstas hayan sido encontradas. Aunque los científicos estudian y publican regularmente muchas propuestas sobre rastros de vida, hasta la fecha ninguna ha sido completamente confirmada por la comunidad y actualmente todos los rastros de más de 3.500 millones de años son controvertidos, aunque el límite de 3.800 millones de años parece probable.

La tercera dificultad radica en la interpretación y comparación con sistemas abióticos, que podrían haber formado huellas similares a firmas o morfologías biológicas. Los avances en las técnicas analíticas desde la década de 1990, como la microscopía electrónica y los análisis isotópicos, a menudo ayudan a resolver la controversia, además de los experimentos con sistemas abióticos. La búsqueda de huellas fósiles se encuentra, por tanto, en la interfaz entre la biología, la química y la geología, y requiere estudios extremadamente rigurosos, con varios métodos de investigación para aumentar la probabilidad de un origen biológico y no sólo abiótico.

La química prebiótica y la transición de lo no vivo a lo vivo

Hoy en día, en todas las especies vivas de la Tierra, entre toda la diversidad existente, existen ladrillos elementales hechos de C, H, N y O que todos poseemos. Estos ladrillos son las proteínas, base de la replicación, el ADN (ácido desoxirribonucleico), que transporta la información genética, y los anfífilos, que constituyen las paredes celulares para la

compartimentación. Estos ladrillos son en realidad secuencias de moléculas "simples", como aminoácidos para las proteínas, ensamblajes de azúcares y bases nitrogenadas con fósforo para el ADN y lípidos para las membranas. El fósforo es un elemento crucial en la química de nuestra vida, a pesar de no ser uno de los átomos abundantes en el universo. Por lo tanto, muchos estudios intentan determinar por qué se "eligió" el fósforo como elemento clave en el ADN y el ARN (ácido ribonucleico) y cuál es su origen (inorgánico u orgánico). Los ladrillos elementales que tiene toda especie viviente de la Tierra son, por tanto, cinco tipos de moléculas (a las que a veces se les llama ladrillos de la vida), aminoácidos, bases nitrogenadas, azúcares, fósforo, lípidos (o ácidos grasos). Estos elementos son esenciales para la vida terrestre y el estudio de su origen nos permite dar más limitaciones al origen de la vida misma. Abióticamente, estas moléculas podrían haberse formado en la atmósfera terrestre, pero también en fuentes hidrotermales. En 1953, Stanley Miller y su estudiante de doctorado Harold Urey llevaron a cabo un experimento pionero que demostró que la atmósfera terrestre podría haber sido el lugar de la química prebiótica. Desde 1953, los experimentos de química prebiótica se han multiplicado y contribuyen cada día un poco más a comprender cómo es posible formar las moléculas básicas de los organismos vivos, a saber, las proteínas, el ADN (o ARN-ácido ribonucleico) y los lípidos en condiciones terrestres.

Otra hipótesis propone que estas moléculas podrían haber sido traídas por objetos celestes (meteoritos). Estos últimos, procedentes de asteroides y cometas, son de gran interés para los científicos porque los meteoritos han demostrado tener una gran riqueza orgánica (4-5 por ciento en masa). Al caer a la Tierra, estos guijarros del espacio podrían haber traído a la Tierra parte del agua y de los elementos siderófilos que se encuentran en su superficie tras la diferenciación hace 4.500 millones de años. Aún no se ha encontrado ninguna forma de vida en estos objetos, pero contienen muchas moléculas, miles de moléculas para los meteoritos carbonosos, tan diversas y variadas como es posible la síntesis abiótica. En los meteoritos se observa, por ejemplo, una gran cantidad de aminoácidos, así como azúcares y muchos precursores orgánicos para la formación de otros componentes básicos de la vida definidos anteriormente.

Estos descubrimientos, que datan del siglo XXI, plantean interrogantes sobre la posibilidad de que haya vida en otros lugares, ya que los componentes básicos pueden sintetizarse en el espacio. Pero estos objetos también nos informan sobre la génesis del sistema solar, su origen y su complejidad que, en comparación con los sistemas exoplanetarios, podría ser bastante única. La comprensión actual de los fenómenos que potencialmente condujeron a la vida tendería a decir que la Tierra tenía condiciones particularmente favorables para la aparición de la Vida, íntimamente ligadas a la formación del sistema solar, a la Tierra misma y a todas las contingencias adyacentes (incluso la presencia de la Luna resultó esencial).

La cuestión, quizás la más importante en astrobiología, es la comprensión de la transición de lo no vivo a lo vivo, tal como se pudo haber realizado en la Tierra primitiva hace unos 4 mil millones de años. Se trata, por tanto, de determinar el paso entre una química de lo no vivo, es decir lo abiótico, representada por toda la materia orgánica y mineral presente en la superficie de la Tierra primitiva en el momento oportuno, hacia una química de lo viviente, lo biótico, representado por las primeras especies vivientes. La principal diferencia entre los dos, entre la química de los vivos y los no vivos, es la selectividad. Los sistemas biológicos han seleccionado moléculas orgánicas por su funcionamiento y propiedades específicas (como la

quiralidad), mientras que la química abiótica contiene todo lo que es posible formar en la química orgánica. Esta observación se verifica mediante el análisis de los meteoritos, que contienen miles de moléculas muy diversas, distribuidas aleatoriamente y por todas partes en diagramas H/C vs O/C, por ejemplo (Fig. 3). Con el mismo método analítico, los análisis de química biótica muestran, por el contrario, concentraciones de moléculas en áreas bien definidas, con familias químicas seleccionadas, y una diversidad mucho menor (Fig. 3).

Para lograr la química prebiótica, actualmente se están estudiando dos enfoques principales: el enfoque de arriba hacia abajo (top-down) que implica estudiar sistemas vivos e intentar sintetizarlos, mientras que el enfoque de abajo hacia arriba (bottom-up) se centra en la química abiótica y su posible evolución hacia la química biológica en un ambiente controlado.

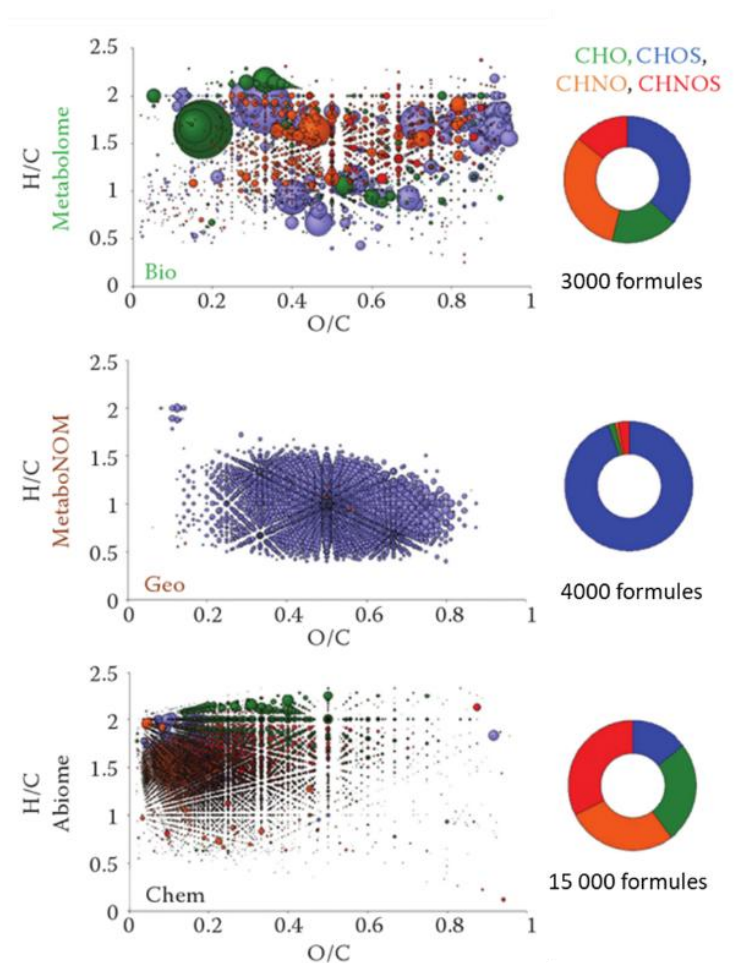


Fig. 3 Análisis detallado mediante espectrometría de masas de alta resolución de moléculas orgánicas presentes en tres tipos de materia, representadas en un diagrama de Van Krevelen de relaciones atómicas H/C vs O/C: en la parte superior la composición molecular de un metaboloma biológico (muestra biológica), en la parte superior la composición molecular de un metaboloma biológico (muestra biológica), en el medio la composición del agua superficial del río (muestra geológica) y en el fondo la composición de la materia orgánica abiótica de un meteorito. Observamos que las composiciones de cada material son muy diferentes, ya sea en términos de número de fórmulas o de familias de moléculas (CHO vs CHOS vs CHNO vs CHNOS). La materia biológica ha seleccionado una diversidad de moléculas más limitada que la materia abiótica. (Kolb, 2014)

Los seres vivos utilizan tres entidades químicas principales: proteínas que constituyen el metabolismo y permiten la replicación y la actividad catalítica, el ADN que transporta información genética y permite codificar la información, las membranas lipídicas que forman un compartimento protector y el intercambio de información que permite la replicación. Como actualmente estas entidades son inseparables de nuestro conocimiento de los organismos vivos, el enfoque de arriba hacia abajo consiste en determinar cuáles aparecieron primero, por qué y cómo. Se están estudiando sistemas de reacción química altamente específicos catalizados por minerales para determinar si en el laboratorio sería posible formar ADN, proteínas y lípidos similares a la vida en la misma sopa.

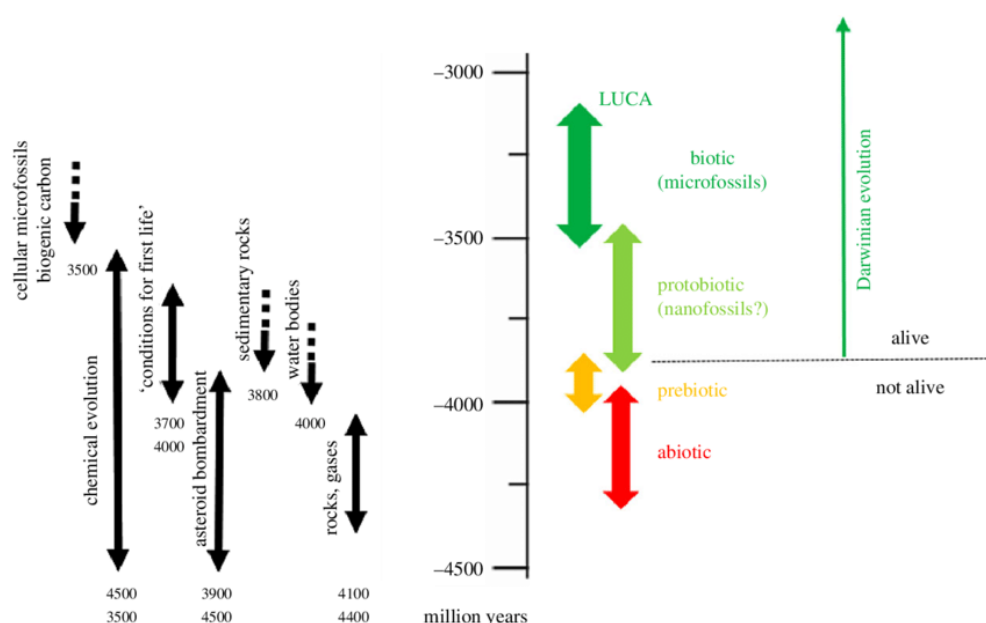


Fig. 4: Origen de la vida como fenómeno planetario. Los datos de sincronización geológica a la izquierda. La progresión de abiótico a biótico se describe con demarcaciones temporales especulativas y algo arbitrarias, con algunas justificaciones que se detallan en el texto. La demarcación entre vivos y no vivos, pero que debería ser un continuo, es entre entidades prebióticas y protobióticas, definida por el surgimiento de la replicación y la evolución. (Crédito: Lancet, Doron & Zidovetzki, Raphael & Markovitch, Omer, 2018).

El enfoque ascendente cuestiona las entidades necesarias para la vida actual y, en cambio, pretende comprender cómo podría evolucionar un sistema químico reuniendo en condiciones favorables los elementos que existían en la Tierra primitiva. El primer elemento esencial para cualquier forma de vida es la presencia de un disolvente, el más evidente y abundante en el universo, el agua. El segundo elemento esencial es la materia orgánica, una materia diversa y más o menos compleja como la analizada en los meteoritos. Como tercer elemento, a menudo se menciona la necesidad de una fuente de energía capaz de organizar la materia en moléculas más complejas y sobre todo permitir la no reversibilidad de las reacciones químicas. Esta propiedad debería permitir una autoorganización de la materia con quizás el establecimiento de sistemas autocatalíticos. Esta energía puede provenir de fotones del Sol, de la temperatura y presión generadas internamente de un cuerpo planetario, o de procesos de oxidación-

reducción con minerales (en fuentes hidrotermales por ejemplo). Se propone que los sistemas químicos, que están fuera de equilibrio y reciben continuamente materia y energía, pueden exhibir propiedades de selectividad química, autocatálisis y replicación química. Una vez que se establezca dicho sistema, la química prebiótica puede eventualmente conducir a la formación de sistemas vivos.

Por lo tanto, no habría una separación estricta entre un sistema abiótico y el biótico, sino más bien una continuidad, pasando por dicha química prebiótica (Fig. 4). Cómo y dónde surgió la vida en la Tierra sigue siendo la cuestión exobiológica más compleja y las posibles vías químicas son tan numerosas que no es obvio que algún día se encuentre la respuesta.

Búsqueda de vida en otras partes

Para buscar vida en otros lugares hay que saber qué buscar y una de las bases de la Astrobiología, pero también su debilidad, es la búsqueda de vida biológicamente similar a la nuestra. Sin lugar a dudas, la distribución química de los átomos en el Universo ha dirigido el uso de carbono, nitrógeno y oxígeno para la vida en la Tierra (Fig. 5). Sería lógico que estos átomos sean los mismos para otras formas de vida en el universo, pero con una estructura de moléculas orgánicas posiblemente diferente a la vida en la Tierra.

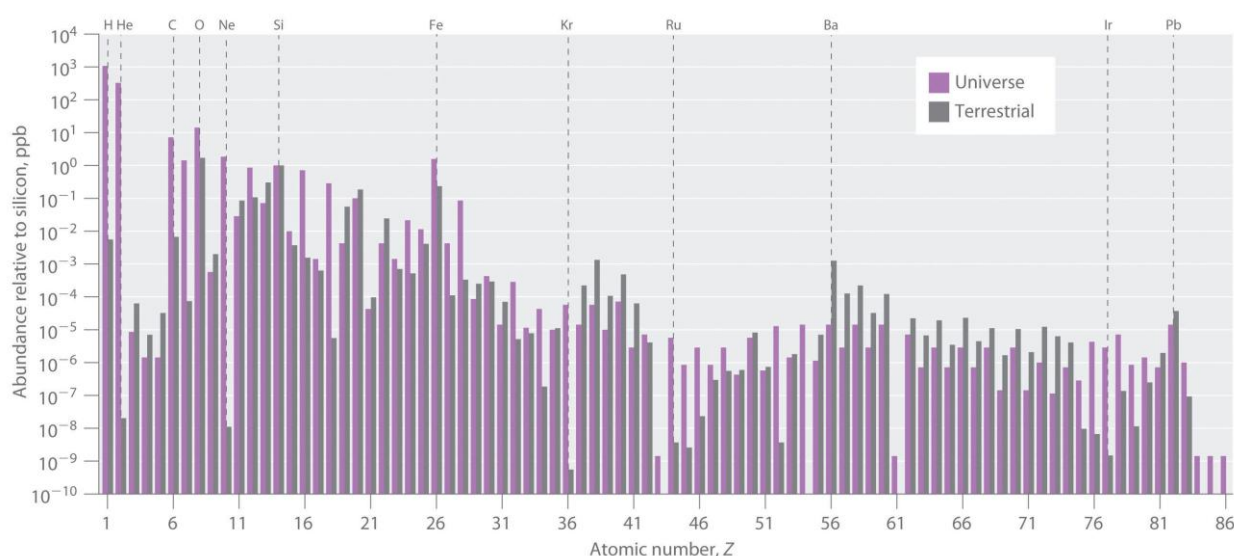


Fig. 5 Abundancia de elementos químicos en la Tierra y el Universo (escala logarítmica). Los elementos más abundantes después del hidrógeno y el helio son el oxígeno, el carbono y el nitrógeno, además del gas inerte, el neón y seguidos de cerca por el hierro y el níquel.

A pesar de las investigaciones activas desde las primeras misiones Apolo, la exploración de numerosos planetas y el regreso de algunas muestras (lunares de 1969, cometas de 2006 y asteroides de 2010, 2023), todavía no se ha encontrado ningún rastro de vida en nuestro sistema solar. Por ello, la comunidad de astrobiología ha repensado y aunado sus conocimientos para determinar en qué entornos específicos sería posible encontrar signos de vida microscópica. La investigación en química prebiótica definida anteriormente plantea, por ejemplo, limitaciones basadas en la vida terrestre. Se ha definido un nuevo término para

conceptualizar este aspecto del entorno favorable; es la noción de habitabilidad. Por primera vez se propuso que un cuerpo planetario era habitable siempre que contuviera agua líquida. En cada sistema planetario será posible entonces definir una zona habitable donde puede haber agua líquida en la superficie de los cuerpos, dependiendo del tamaño de la estrella, la distancia del cuerpo planetario a la estrella y la estabilidad de su órbita. permanecer en la zona habitable (Fig. 6). En los últimos años, la definición de zona habitable ha sido revisada y ampliada enormemente con el descubrimiento de grandes océanos de agua líquida bajo la superficie helada de las lunas de Júpiter y Saturno (Encélado, Europa, Ganímedes, Titán, Calisto) (Fig. 6). La noción de habitabilidad hoy se refiere a un cuerpo habitable, que, además de agua líquida, contendría materia orgánica (C, H, N, O, etc.), energía (actividades solares o termogeológicas) y una cierta estabilidad sobre tiempo para permitir el desarrollo de la vida. Por lo tanto, la búsqueda de vida en otros lugares comienza por buscar primero estos entornos habitables. La noción de habitabilidad es un término debatido dentro de la comunidad Astrobiológica, porque su definición está ligada a las condiciones que permitieron el surgimiento y evolución de la única vida (terrestre) que conocemos y nada nos dice que nos dirigimos a los objetos habitables correctos considerando solo esas condiciones. La extensión de la zona habitable a ambientes subterráneos (como se muestra en la figura 6) es un ejemplo de la investigación sobre la posibilidad de vida en estos ambientes del sistema solar. Además, los estudios de filogenia y biología terrestre también han impuesto limitaciones a la investigación cuando se trata de formas de vida no macroscópicas, como bacterias microscópicas, rastros químicos o fósiles de posible existencia actual o pasada.

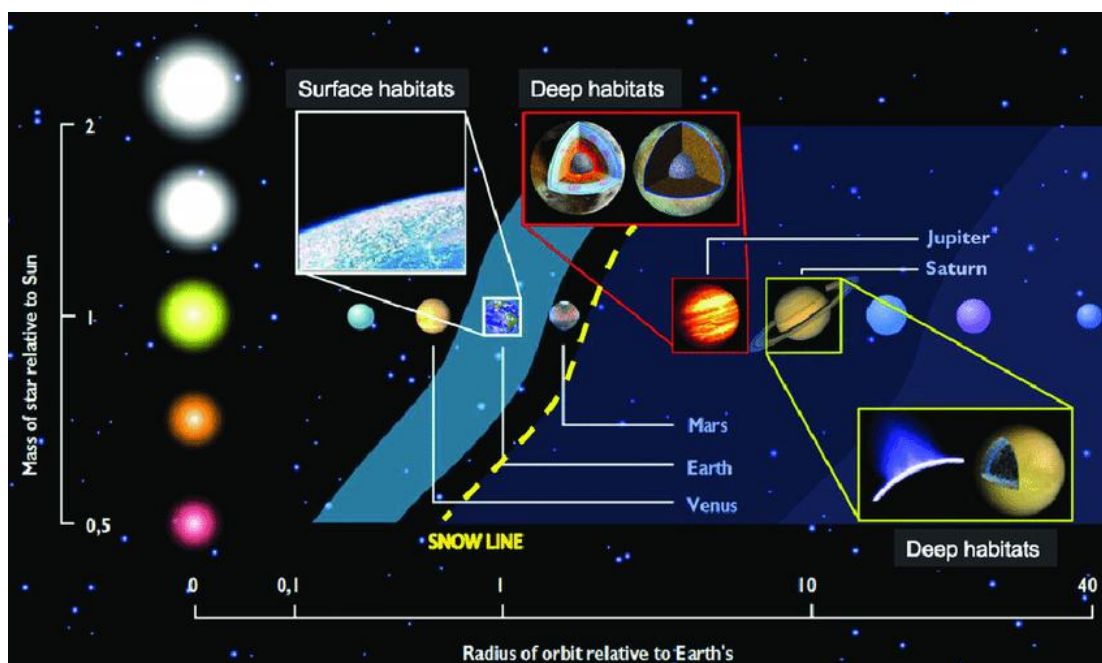


Fig. 6: Representación esquemática de las zonas habitables del sistema solar. La zona habitable se define donde hay agua líquida: esta zona depende de la masa de la estrella y de la distancia del cuerpo a la estrella para que el agua sea estable en la superficie o debajo de ella. Con esta definición y en nuestro sistema solar, la Tierra estaría justo en la mitad de la zona habitable mientras que Marte se encuentra en el límite. Los satélites helados de Júpiter y Saturno también serían cuerpos habitables debido a la presencia de agua líquida bajo su capa de hielo (Créditos: Neal Powell, Imperial College, Londres).

Un breve recorrido por los cuerpos planetarios de nuestro Sistema Solar y su interés astrobiológico

Mercurio, el planeta más cercano al Sol, es demasiado caliente y tiene muy poca atmósfera para haber creado las condiciones necesarias para el desarrollo de la vida. Venus, nuestro "planeta hermano", por el contrario, tiene una química orgánica relativamente compleja, con moléculas de azufre y fósforo en una atmósfera extremadamente densa compuesta por más del 96% de CO₂. Sin embargo, no se encuentra en la zona habitable del sistema solar porque carece de un componente esencial: el agua. Habiéndose beneficiado de aportes exógenos como la Tierra después de su formación, se propone que Venus pudo haber tenido agua líquida en su superficie y una atmósfera rica en agua hace 4.500 millones de años y durante algún tiempo. Pero en la actualidad la superficie de Venus es sólo vulcanismo activo con temperaturas de alrededor de 460°C. Si la vida se desarrolló en Venus en el momento más favorable, se propone que sobrevivió en forma de microorganismos en las nubes de su atmósfera, mucho más indulgente en términos de temperatura (~75°C). Varias misiones espaciales han estudiado Venus desde la década de 1960 y, a pesar de las propuestas sobre la existencia de microorganismos extremófilos en las nubes de Venus, hasta ahora no se ha observado formalmente ninguna evidencia.

Marte, el cuarto planeta del sistema solar, ha sido propuesto a menudo como el mejor lugar del sistema solar para haber tenido, o todavía tener, posibilidades de vida. Marte desató la locura por la búsqueda de rastros de vida muy temprano en la historia de la exploración del sistema solar porque los astrónomos británicos e italianos (William Rutter Dawes y Giovanni Schiaparelli) informaron haber visto gigantescos canales de irrigación observando la superficie de Marte en 1860-1870. Estos canales, interpretados como conexión de zonas habitadas, habrían permitido el transporte de alimentos entre ellas. A pesar del desarrollo de los telescopios y la proliferación de observaciones, en particular las de Percival Lowell (1855-1916), no fue hasta la década de 1940 que estas observaciones se confirmaron gracias a nuevos datos de observación menos borrosos que definían mejor los contornos de los cráteres y valles de Marte. Los sobrevuelos de las sondas estadounidenses Mariner en los años 1960 y 1970 demuestran definitivamente la inexistencia de canales en la superficie de Marte. Sin embargo, persiste el interés astrobiológico por el planeta Marte, debido a que Marte presenta características relevantes, que legitiman la posibilidad de vida marciana. La existencia de vida microbiana ya se consideró en los años 70 durante la preparación de la misión Viking. A continuación, los dos módulos de aterrizaje fueron equipados con instrumentos capaces de realizar tres experimentos destinados a poner de relieve la vida marciana, por ejemplo detectando la actividad biológica fotosintética o proporcionando nutrientes a las bacterias marcianas. Los tres experimentos dieron respuestas negativas, todas interpretables mediante procesos abióticos, como la oxidación de la superficie que conduce a la descomposición de la materia y la desgasificación de O₂. La misión Viking, sin embargo, confirmó la presencia de agua líquida en el pasado de Marte, observando cauces, ríos secos o incluso valles dendríticos, confirmando que el planeta era, al menos en el pasado, habitable. Posteriormente, se observaron rocas hidratadas que sólo pueden formarse en un medio acuoso, como arcillas o sulfatos, mediante sondas en órbita y vehículos en la superficie (como la sonda orbital Mars Express).

Con la observación de huellas como flujos, deltas o incluso señales de tsunamis cerca de la costa, se descubrió que efectivamente Marte había tenido ríos, océanos y lagos en su superficie. Según modelos geofísicos, Marte podría haber tenido agua líquida en su superficie durante al menos mil millones de años. Esta agua, todavía presente en los minerales que actualmente cubren la superficie de Marte, ha sido identificada por sondas en órbita y rovers en la superficie. Actualmente, en los polos hay hielo de agua en los casquetes polares y se sospecha fuertemente que el agua está presente en mayores cantidades en la corteza marciana (probablemente en forma de hielo mezclado con minerales). Actualmente, la presión en la superficie de Marte es excesivamente baja para mantener agua líquida (6 mbar). Sin embargo, en el pasado, y debido a la presencia de un campo magnético ahora extinto, Marte pudo haber tenido una atmósfera mucho más densa. El gran handicap de Marte es ser un planeta pequeño, que no tenía suficiente energía interna para mantener la actividad geológica generando el campo magnético, esencial para mantener su atmósfera contra el viento solar. Marte es considerado desde hace mucho tiempo un planeta muerto pero en el que la vida podría haberse desarrollado al mismo tiempo que en la Tierra y quizás persistir bajo tierra. Encontrar vida en Marte proporcionaría muchas respuestas sobre la aparición de vida en la Tierra. Además, si existiera vida en Marte, incluso en forma de microorganismos, y dado que el planeta ya no es geológicamente activo, debería ser posible descubrirla en forma de huellas fósiles en la superficie o incluso esperar que exista y haya sobrevivido bajo tierra.

La atmósfera de Marte es fina y rica en CO₂, lo que permite la penetración de los rayos solares y cósmicos durante miles de millones de años, dando como resultado una superficie altamente oxidante y completamente seca. El módulo de aterrizaje de la misión Phoenix (2008) identificó oxidantes como perclorato y peróxidos. Actualmente se ha demostrado que son en gran medida responsables de la degradación de la materia orgánica en la superficie y son contaminantes para los análisis realizados por los rovers. Hubo que esperar a que la misión “Laboratorio Científico de Marte” (MSL) con el rover “Curiosity”, que aterrizó en suelo marciano en 2012, pudiera finalmente determinar si Marte estaba compuesto de materia carbonosa. Esta misión NASA/JPL lleva a bordo un instrumento capaz de detectar e identificar moléculas orgánicas (muestra análisis en Mars-SAM). Es un espectrómetro de masas con un cromatógrafo de gases con un pirolizador para vaporizar moléculas y separarlas, o un láser pulsado para desorber moléculas de la superficie de la muestra. Fue en 2015 cuando se descubrieron las primeras moléculas orgánicas (anillos aromáticos clorados y alcanos). Desde entonces, se han analizado otras moléculas orgánicas en el suelo marciano según su composición mineralógica. En 2022, hasta la fecha no se ha identificado ninguna molécula del tipo “componentes básicos de la vida”, pero continúan los estudios en otros lugares del planeta y se planean nuevas misiones. En particular, se albergan esperanzas en la exploración del subsuelo de Marte, protegido de la oxidación y la irradiación de la superficie. De hecho, los rovers anteriores ya han revelado que bajo los primeros centímetros de la superficie es posible que haya hielo, pero no se sabe qué sucede más allá de estos primeros centímetros. La principal misión astrobiológica futura a Marte es la misión Exomars de la ESA, que debería excavar hasta 2 m de profundidad para recuperar muestras no alteradas como en la superficie y que, por tanto, podrían contener mucho más material conservado. La misión Exomars también incluye el instrumento descrito anteriormente (GC-MS) y analizará moléculas orgánicas. La misión se pospuso hasta finales de la década de 2020 debido a los conflictos mundiales. Marte no ha dicho su última palabra y sigue siendo el objetivo elegido para la investigación de rastros de vida y el conocimiento en planetología.

En las últimas décadas se han descubierto otros cuerpos habitables de interés astrobiológico más allá de la barrera de los asteroides, se trata de los satélites de planetas gaseosos gigantes; los mismos planetas gigantes tienen un interés limitado para la astrobiología porque no tienen superficies y, por lo tanto, no tienen rocas. Por otro lado, son de considerable importancia para comprender la formación y el origen del sistema solar. Son sus satélites los que interesan, en particular Ganímedes, Calisto y Europa alrededor de Júpiter, Encelado y Titán alrededor de Saturno. Revelados gracias a la sonda Cassini-Huygens (1997-2017), que visitó estos mundos durante 15 años, estos satélites helados sorprenden por su diversidad y la abundancia de agua líquida que contienen. Europa, por ejemplo, contendría un océano diez veces mayor que el de la Tierra, mientras que el satélite sería tres veces más pequeño que nuestro planeta. Esta agua líquida se mantiene por los efectos de marea generados por la atracción gravitacional de las lunas con Júpiter. Del lado de Saturno está Encelado, que despierta especial interés en la astrobiología con el descubrimiento en 2014 de géiseres de agua en su superficie, que se extienden hasta 100 km sobre su superficie. Esta observación ha revelado sin lugar a dudas la presencia de un océano bajo la capa de hielo. Los estudios en astrobiología se interesan entonces por el posible surgimiento de vida en estos ambientes, que han sido definidos como habitables (Figura 6). El satélite más grande de Saturno, Titán, también es de gran interés debido a la gran cantidad de materia orgánica que se forma en su atmósfera. En 1980 y 1981, las sondas Voyager-1 y Voyager-2 pasaron sobre Titán y revelaron un mundo con una atmósfera extremadamente densa compuesta principalmente de nitrógeno y metano. La atmósfera es tan densa que oscurece la superficie del satélite. La química en la atmósfera de Titán ha demostrado ser extremadamente compleja, lo que da como resultado, en particular, la formación de aerosoles orgánicos que se sedimentan en la superficie. La misión Cassini-Huygens, de la cual Huygens fue un módulo de aterrizaje que cruzó la atmósfera de Titán para aterrizar en su superficie, confirmó esta compleja química orgánica en la atmósfera. Se obtuvieron impresionantes imágenes de la superficie cubierta de granos orgánicos, dunas y lagos de hidrocarburos. Los modelos astrofísicos han propuesto que Titán puede albergar un océano de agua líquida debajo de su superficie. Titán presenta entonces todos los ingredientes previamente definidos para el surgimiento de una rica química prebiótica y una posible forma de vida. Los modelos geoquímicos evolutivos sugieren que desde el primer millón de años después de la formación de Titán, este océano subterráneo estuvo en contacto con la atmósfera, en la que se habrían producido las primeras moléculas complejas. Por analogía con la Tierra, en este océano de Titán se prevé la presencia de fuentes hidrotermales, que constituyen una fuente de energía para las moléculas orgánicas y un entorno potencial para los sistemas prebióticos. Por tanto, no se puede excluir la posibilidad de que haya vida en el océano de Titán, que podría haber persistido durante varios miles de millones de años. La muy ambiciosa nueva misión de la NASA (Dragonfly), cuyo objetivo es Titán, debería ser esencial desde este punto de vista. Seleccionada en junio de 2019 en el marco del programa Nuevas Fronteras de la NASA, la misión debería partir en 2027 y llegar a Titán en 2034. La novedad de esta misión reside en la explotación de la densa atmósfera de Titán (1,5 veces la de la Tierra) y su baja gravedad para volar un aeróptero, llamado aerobot, con una masa de 450 kg en su superficie. Los objetivos científicos son múltiples, como afirmar la presencia de un océano en el subsuelo de Titán, analizar materiales superficiales para identificar moléculas de interés astrobiológico, caracterizar la meteorología de Titán o incluso medir la actividad sísmica para determinar la actividad interna de Titán. Para ello, el aerobot llevará a bordo cuatro grupos de instrumentos, incluido un espectrómetro de masas

acoplado a cromatografía de gases (DraMS-GC), contribución francesa al CNES y legado de las misiones marcianas.

Más allá del Sistema Solar

Con el estado actual de los conocimientos y avances en el campo de la Astrobiología, es muy difícil plantear la hipótesis de un planeta habitado y la presencia comprobada de vida en nuestra galaxia o más allá. Parece haber cada vez más sitios potenciales para el desarrollo de la vida, pero ¿qué pasa con el desarrollo real de la vida? Más allá de nuestro sistema solar, dependiendo del número de estrellas en el universo, es probable que existan miles de millones de otros sistemas planetarios, con zonas habitables, materia orgánica y la energía necesaria para la vida. Fue en 1995 cuando Didier Queloz y Michel Mayor observaron por primera vez un exoplaneta. Desde entonces, y con el avance de las técnicas de observación, hoy (2024) se han localizado, observado y catalogado más de 5500 exoplanetas en nuestra galaxia. El descubrimiento de estos planetas extrasolares ha dado lugar a importantes descubrimientos, como cuestionar la formación de nuestro propio sistema solar. Las primeras detecciones de exoplanetas revelaron sobre todo la presencia de planetas gigantes gaseosos, del tipo Júpiter, que orbitan muy cerca de su estrella en sistemas con 1, 2 o 3 cuerpos planetarios. Este paradigma comparado con nuestro sistema solar con 8 planetas, provocó una profunda reconsideración de la hipótesis de la formación de nuestro sistema solar. Se han estudiado nuevos modelos de formación del sistema solar. El más destacable fue propuesto en 2011 por Kevin Walsh, Alessandro Morbidelli y Sean Raymond y proporcionó respuestas a una serie de enigmas sobre la composición y posición de los diferentes cuerpos de nuestro sistema solar. El modelo afirma que Júpiter habría alterado los planetas embrionarios al migrar hacia el Sol y luego habría regresado a su posición actual, gracias en parte a la presencia de Saturno (Fig. 7). La aproximación de Júpiter hasta $\sim 1,5$ AU truncó gradualmente el disco protoplanetario y se redujo el material disponible aguas abajo de Júpiter. Este modelo permite, por ejemplo, explicar el pequeño tamaño del planeta Marte y su desastroso destino, mientras que, en un modelo de formación estática, Marte debería haber sido más grande que la Tierra.

Otro descubrimiento importante se refiere a la observación de la mayoría de estrellas de clase enana roja en nuestra galaxia. Son estrellas pequeñas, muy activas y con vidas del orden de cien mil millones de años. En comparación, nuestro Sol sólo vivirá unos diez mil millones de años y, por lo tanto, si la vida se desarrollara (o se hubiera desarrollado) en un planeta alrededor de una enana roja, tendría tiempo de evolucionar y volverse más compleja, al menos tanto como en la Tierra. Sin embargo, debido a la baja masa de las enanas rojas ($< 0,4$ masa solar), los exoplanetas necesitan estar relativamente cerca de la estrella para ubicarse en la zona habitable. Esto da como resultado una velocidad de rotación sobre sí mismos similar a la de su rotación alrededor de su estrella y, por lo tanto, siempre presentarán la misma cara de día o de noche. Este parámetro es sumamente importante porque afectará el clima y estaciones del exoplaneta y por tanto afectará directamente a las posibles formas de vida.

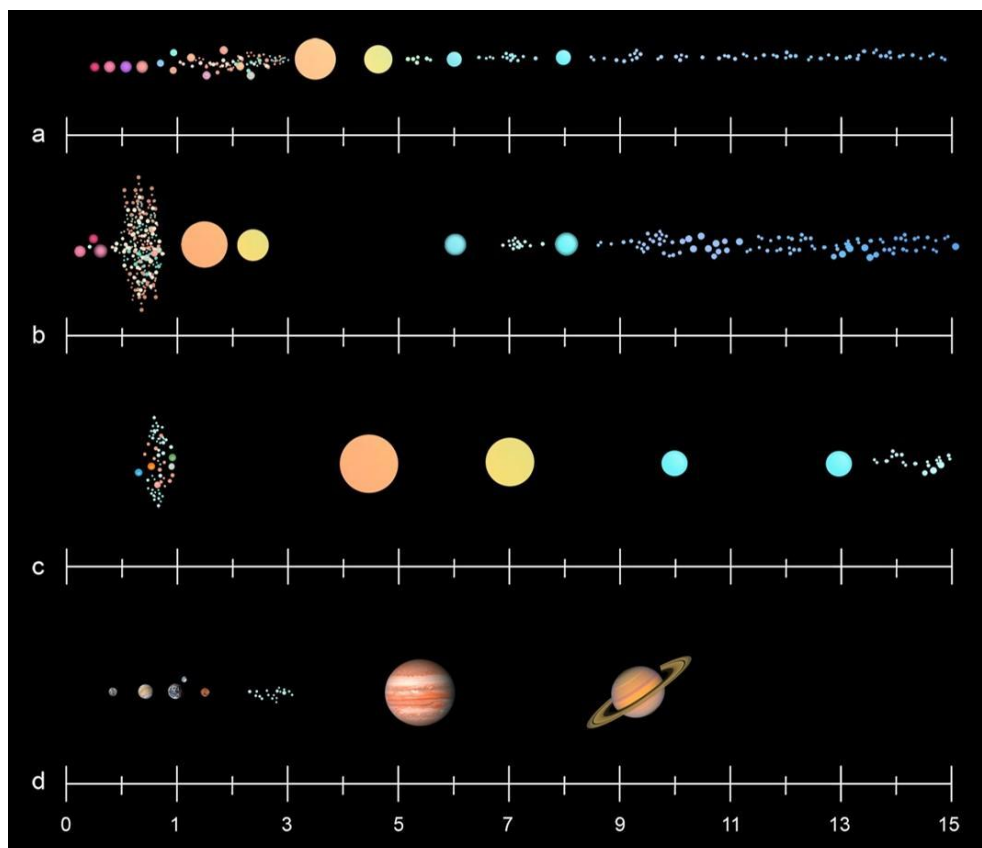


Fig. 7: Representación esquemática de la hipótesis del “grand tack” para explicar la formación de nuestro sistema solar y sus planetas; a) inicio del modelo con la formación de los planetas gigantes en curso, luego b) primera migración de Júpiter hacia el sol con Saturno, c) segunda migración de Júpiter hacia el sistema solar exterior llevando a Saturno y empujando asteroides y cometas más allá de las 13 UA, d) posición de los planetas actualmente con el cinturón de asteroides entre 2 y 3 UA. @ Black Alley

También se propone que la presencia de atmósfera en exoplanetas ubicados en zonas habitables es una condición importante de habitabilidad. Recientemente se han observado exoplanetas con atmósferas ricas en agua. Sin embargo, actualmente no conocemos todos los escenarios que favorecen o alteran el mantenimiento de una atmósfera en estos exoplanetas que orbitan alrededor de estrellas de tipos diferentes a nuestro Sol.

Los diversos exoplanetas observados hasta la fecha, con velocidades de rotación, oblicuidades y densidades extremadamente variadas, hacen que la noción de habitabilidad sea aún más difícil de definir. El impacto en el surgimiento o mantenimiento de la vida en estos ambientes aún se desconoce y constituye un área importante de investigación en Astrobiología.

Conclusiones

Los estudios de Astrobiología, descritos aquí, reflejan la dificultad y complejidad de responder preguntas sobre el origen y la evolución de la vida y la presencia de vida en otros lugares. La interdisciplinariedad es crucial en astrobiología y es clave para importantes avances en el campo.

En resumen, la Astrobiología intenta determinar si podría existir vida en otras partes del universo, estudiando nuestro propio origen y, de ser así, de qué forma, para intentar responder a una pregunta existencial: ¿estamos solos en el cosmos?

Bibliografía

- Bibring, J.-P. (2022) *Seuls dans l'Univers*, Odile Jacob.
- Fiore, M. (dir.) (2022) *Prebiotic Chemistry and Life's Origin*, Royal Society of Chemistry,
- Forterre, P., Brocher, C., Philippe, H. (2002) Evolution of the Archaea , in *Theoretical Population Biology*, vol. 61, n° 4, pp. 409-420.
- Gargaud, M., Claey's, P., Martin, H. (Eds.) (2005). *Des atomes aux planètes habitables* (Vol. 3). Presses Univ de Bordeaux.
- Gargaud, M., Martin, H., Lopez-García, P. et al. (2009) *Le Soleil, la Terre... la vie. La quête des origines*, Belin.
- Kolb, V. M (dir) (2014) *Astrobiology. An Evolutionary Approach*, CRC Press, Chapter 4.
- Lancet, D., Zidovetzki, R., Markovitch, O.. (2018) *Systems protobiology: Origin of life in lipid catalytic networks*. Journal of The Royal Society Interface. 15. 20180159. 10.1098/rsif.2018.0159.
- ñ
- Lederberg, J. (1960) *Exobiology : Approaches to life beyond the Earth*, in *Science*, vol. 132, n° 3424, pp. 393-400.
- Oparin, A., (1957) *The origin of life on the Earth*, Academic Press Inc., New York, 3^e éd.

Videos in [Astrobioeducation.org](https://astrobioeducation.org) <https://astrobioeducation.org/fr/>