THE SEARCH FOR LIFE IN THE UNIVERSE, THE BEGINNING OF A NEW SCIENTIFIC ERA

Didier Queloz

Durante siglos nos hemos preguntado si estamos solos en el universo. Es una cuestión que encontramos en la filosofía y la literatura desde la Antigüedad, pero que ahora empieza a convertirse en una pregunta científica. Estamos reuniendo observaciones, medidas y hechos que, con el tiempo, nos permitirán evaluar la posibilidad de que exista vida más allá de la Tierra. Para responderla debemos abordar simultáneamente otra pregunta: ¿cómo y por qué surgió la vida en nuestro planeta?

Las dimensiones del universo y la enorme cantidad de estrellas de nuestra galaxia han alimentado la intuición de que no podemos ser los únicos. Pero los números, por sí solos, no constituyen una demostración. Durante mucho tiempo ni siquiera sabíamos si otras estrellas tenían planetas. Se suponía que los sistemas planetarios debían de ser frecuentes, pero había que comprobarlo. Desde la década de 1970 se desarrollaron programas de búsqueda de planetas y de exploración del sistema solar, incluidas las misiones Viking a Marte, motivados en parte por esta cuestión.

En el sistema solar conocemos mundos rocosos como Venus, la Tierra y Marte. Por ahora, la única vida confirmada es la terrestre. También nos interesan satélites de los planetas gigantes, como Europa, Encélado o Titán, porque presentan entornos con ingredientes relevantes para la química. Sin embargo, la existencia de condiciones potencialmente interesantes no equivale a haber encontrado organismos.

El descubrimiento de 51 Pegasi b cambió la perspectiva

El descubrimiento de 51 Pegasi b, realizado junto con Michel Mayor en 1995, supuso un punto de inflexión. Por primera vez se detectó un planeta orbitando una estrella semejante al Sol. La detección se obtuvo mediante la técnica de velocidades radiales, que mide los pequeños desplazamientos Doppler producidos por el movimiento de la estrella alrededor del centro de masas del sistema.

El planeta resultó desconcertante: era un gigante gaseoso comparable a Júpiter, pero describía una órbita extremadamente próxima a su estrella. No encajaba con el modelo que habíamos construido a partir del sistema solar, donde los planetas gigantes se encuentran lejos del Sol. Su elevada temperatura lo convertía, además, en un lugar nada prometedor para la vida. Sin embargo, inmediatamente después del anuncio muchas personas preguntaron si podía albergarla. Esa reacción mostraba hasta qué punto relacionamos de manera espontánea la existencia de planetas con la posibilidad de vida.

La sorpresa fue también una oportunidad. Al demostrar que existían planetas tan distintos de los nuestros, 51 Pegasi b abrió un campo entero de investigación sobre la diversidad de sistemas planetarios y los mecanismos de su formación.

Cómo se forman los planetas y por qué pueden migrar

Las observaciones de discos alrededor de estrellas jóvenes, como β Pictoris, permiten estudiar el entorno en que nacen los planetas. En las imágenes obtenidas a diferentes longitudes de onda distinguimos el polvo y el gas, que no se distribuyen de la misma manera. Las partículas sólidas tienden a concentrarse en una capa relativamente delgada; el gas ocupa una región más extensa debido a su equilibrio de presión. Además, a ciertas distancias de la estrella, algunas sustancias volátiles se condensan y pasan a formar parte de los sólidos.

Esta distribución ayudaba a explicar por qué esperábamos encontrar gigantes gaseosos en regiones alejadas: allí resulta más sencillo reunir materiales sólidos y construir núcleos capaces de captar grandes cantidades de gas. El sistema solar parecía un ejemplo natural de ese proceso. Los júpiteres calientes obligaron a revisar el esquema.

Una explicación fundamental es la migración planetaria. Los planetas pueden desplazarse mientras interactúan con el disco de gas y polvo en el que se forman. En consecuencia, la posición actual de un planeta no siempre coincide con su lugar de origen. Este detalle complica enormemente la interpretación de su composición: dos mundos con masas y radios parecidos pueden haber acumulado materiales muy distintos si se formaron en regiones diferentes.

Miles de exoplanetas y una diversidad inesperada

Actualmente conocemos miles de exoplanetas. Las dos técnicas más productivas han sido las velocidades radiales y los tránsitos. En este último caso medimos la pequeña disminución de brillo que se produce cuando un planeta pasa por delante de su estrella. Ambas técnicas favorecen la detección de planetas con períodos orbitales relativamente cortos, por lo que los catálogos observados están condicionados por importantes sesgos de selección.

Entre los mundos descubiertos destacan los júpiteres calientes, pero también poblaciones muy numerosas de supertierras y minineptunos, con tamaños o masas intermedios entre los de la Tierra y Neptuno. Muchos orbitan dentro de una distancia comparable a la órbita de Mercurio, una arquitectura que no encontramos en nuestro sistema solar. Los gigantes calientes son relativamente escasos, mientras que los planetas pequeños en órbitas cortas son frecuentes.

Cuando conocemos tanto la masa como el radio podemos calcular la densidad media, pero no siempre basta para deducir la estructura interna. Un planeta podría ser predominantemente rocoso, tener una atmósfera extensa o poseer una proporción importante de materiales volátiles. Los términos «parecido a la Tierra» o «supertierras» suelen describir características físicas concretas, no demostrar que se trate de una segunda Tierra.

La diversidad observada indica que el sistema solar representa solo una de las muchas posibilidades de organización planetaria. Para estudiar la vida necesitamos ir más allá del inventario de masas y radios: debemos averiguar cómo son realmente esos mundos.

Leer la composición de una atmósfera lejana

La atmósfera terrestre es extraordinariamente delgada en comparación con el tamaño de nuestro planeta. Desde el espacio, la Tierra puede presentar un tamaño aparente ligeramente diferente según la longitud de onda a la que la observemos. Algunas bandas atraviesan la atmósfera con relativa facilidad, mientras que otras son absorbidas por moléculas situadas a distintas alturas. En el infrarrojo también podemos estudiar la emisión térmica.

Este principio se aplica a los exoplanetas. Durante un tránsito, una pequeña parte de la luz de la estrella atraviesa la atmósfera del planeta. La absorción molecular y la dispersión modifican ligeramente la profundidad del tránsito según la longitud de onda. Al comparar muchas bandas espectrales obtenemos información sobre las sustancias presentes. La dispersión de Rayleigh, por ejemplo, puede producir una dependencia característica hacia las longitudes de onda azules.

En planetas grandes, como el gigante gaseoso WASP-39 b, el telescopio espacial James Webb ha obtenido espectros de transmisión muy detallados. En ellos se reconocen señales de distintas moléculas, entre ellas agua y dióxido de carbono. Estas medidas permiten estudiar la química atmosférica y relacionarla con los procesos de formación y evolución del planeta.

La presencia de agua, por sí sola, no demuestra que exista vida. El agua es una molécula abundante en el universo: el hidrógeno y el oxígeno están ampliamente distribuidos y pueden combinarse en nubes moleculares y entornos planetarios. Lo verdaderamente difícil es interpretar el conjunto de las observaciones y comprender qué nos dice sobre la historia del mundo estudiado.

K2-18 b y la prudencia ante las posibles biofirmas

La investigación se vuelve mucho más complicada cuando estudiamos planetas de menor tamaño. Sus señales atmosféricas son débiles y los errores observacionales adquieren un peso considerable. En ese régimen ya no siempre reconocemos directamente las bandas espectrales: necesitamos comparar los datos con modelos atmosféricos y utilizar métodos estadísticos, frecuentemente bayesianos, para evaluar qué interpretaciones resultan más plausibles.

Un ejemplo es K2-18 b, que ha recibido una gran atención mediática por las propuestas sobre posibles moléculas relacionadas con la vida. Entre las sustancias discutidas se encuentra el sulfuro de dimetilo, DMS, producido en la Tierra por procesos biológicos. Pero la calidad y la interpretación de los datos no permiten afirmar que se haya detectado vida. La señal atribuida a esa molécula es controvertida y podrían existir explicaciones diferentes.

Los indicios de otras especies químicas, como metano y dióxido de carbono, ya son interesantes porque plantean preguntas sobre la composición y el estado de la atmósfera. K2-

18 b no tiene por qué parecerse a la Tierra ni a Neptuno: podría representar una clase intermedia de planeta. Antes de hablar de vida debemos determinar qué tipo de mundo estamos observando y cuáles son los procesos físicos y químicos que dominan en él.

Las estrellas pequeñas y los límites de la zona habitable

Las estrellas de tipo M, más pequeñas y frías que el Sol, ofrecen una ventaja observacional: un planeta rocoso puede recibir una irradiación comparable a la terrestre aunque describa una órbita muy próxima a su estrella. Sistemas compactos como TRAPPIST-1 muestran que pueden existir varios planetas de tamaño terrestre alrededor de una misma estrella pequeña. Sus interacciones orbitales permiten incluso estimar sus masas.

La denominada zona habitable identifica, de forma aproximada, la región en la que un planeta con determinadas propiedades atmosféricas podría mantener agua líquida en su superficie. Es una herramienta útil para comparar sistemas, pero no una garantía de habitabilidad ni, mucho menos, de presencia de vida.

Las estrellas pequeñas pueden permanecer muy activas durante largos períodos, con radiación energética y flujos de partículas capaces de modificar o erosionar las atmósferas de sus planetas. Por eso uno de los problemas centrales es averiguar si esos mundos han conservado una atmósfera y, en caso afirmativo, cuál es su composición. Ya se están obteniendo observaciones de estos sistemas, pero las respuestas definitivas todavía quedan lejos.

Venus, la Tierra y Marte: tres historias muy distintas

Venus y la Tierra tienen masas y tamaños parecidos. Si observáramos Venus como un exoplaneta y solo conociéramos su masa y su radio, podríamos clasificarlo precipitadamente como un gemelo terrestre. Sin embargo, sus condiciones superficiales son radicalmente diferentes. La comparación muestra que la geofísica y la evolución atmosférica son esenciales para evaluar la posibilidad de vida.

La cantidad de agua, la composición atmosférica, la actividad volcánica, el reciclaje del carbono, la tectónica y la historia de la radiación estelar pueden alterar profundamente el destino de un planeta. Marte ofrece otro contraste: existen indicios de agua en su pasado y reservas actuales de agua en forma de hielo, pero la presión atmosférica presente dificulta la estabilidad del agua líquida en la superficie.

La Tierra tampoco ha permanecido inmutable. En sus primeras etapas recibió materiales de su entorno, perdió parte de los gases ligeros y experimentó una evolución química y geológica prolongada. Su atmósfera inicial fue muy distinta de la actual. La acumulación de oxígeno se produjo mucho después de las primeras evidencias de vida, y sigue siendo fundamental comprender la interacción entre los procesos biológicos y los cambios geológicos.

Para buscar vida en otros planetas propongo, en primer lugar, comprender el planeta. No basta con preguntar si puede surgir la vida; también debemos averiguar si las condiciones adecuadas pueden mantenerse durante el tiempo suficiente para que evolucione.

La Tierra primitiva y el tiempo necesario para la vida

Las evidencias geológicas más antiguas compatibles con actividad biológica muestran que la vida apareció relativamente pronto en la historia de la Tierra, aunque la interpretación y la antigüedad precisa de algunos registros continúan siendo objeto de investigación. Los estromatolitos constituyen una referencia importante porque preservan estructuras asociadas a comunidades microbianas.

La historia posterior, sin embargo, fue muy larga. Durante miles de millones de años predominaron formas de vida microscópicas. La aparición de células eucariotas, la diversificación de organismos complejos y la explosión cámbrica tuvieron lugar mucho después. Los seres humanos ocupamos una porción minúscula de esa cronología. Si queremos comprender el origen de la vida, debemos mirar especialmente hacia las primeras etapas, no concentrarnos únicamente en los organismos complejos.

Un planeta podría iniciar procesos biológicos y después perder las condiciones que permiten sostenerlos. Quizá algo semejante ocurrió en Marte o pudo ocurrir en Venus; todavía no lo sabemos. La estabilidad ambiental durante períodos muy largos podría ser tan importante como la aparición inicial de la vida.

La Tierra primitiva debió de ser un entorno químicamente activo, con agua, aportes de materiales, volcanismo y diversas fuentes de energía. Esas condiciones ofrecen escenarios para la química prebiótica. No sabemos todavía qué secuencia exacta transformó sustancias no vivas en los primeros sistemas capaces de mantenerse y reproducirse.

¿Está la vida inscrita en las leyes del universo?

El bioquímico Christian de Duve defendía la idea de que la vida está inscrita en la propia estructura del universo. Es una propuesta sugerente: las leyes físicas permiten la formación de estrellas, la síntesis de elementos químicos, la aparición de galaxias y la construcción de planetas. ¿Por qué no podrían permitir también, bajo determinadas condiciones, la emergencia de la vida?

La extraordinaria complejidad de los organismos actuales puede hacernos pensar que su origen es casi imposible. Pero también sería difícil imaginar una estrella o un sistema planetario si desconociéramos la física que los produce. La pregunta científica es identificar las condiciones y los mecanismos que hacen posible la transición de la química no biológica a la biología.

Para avanzar necesitamos reunir disciplinas distintas: astrofísica, ciencias planetarias, geología, química prebiótica y biología. Hay que entender cómo se forman moléculas orgánicas, cómo aparecen sistemas que almacenan y transmiten información y cómo se desarrollan procesos de catálisis antes de que existan los complejos mecanismos biológicos actuales. Solo cuando conozcamos estos pasos podremos valorar si la aparición de la vida requiere circunstancias extremadamente particulares o si admite muchos caminos posibles.

La paradoja de Fermi y las civilizaciones extraterrestres

Si los planetas son frecuentes y la vida puede aparecer en distintos lugares, surge inevitablemente la paradoja de Fermi: ¿dónde está todo el mundo? Conviene comenzar con un hecho: no tenemos pruebas confirmadas de civilizaciones extraterrestres. No hemos recibido señales inequívocas, ni encontrado sondas o estructuras que demuestren su existencia.

Podemos imaginar varias respuestas. La primera es que la Tierra sea extraordinariamente rara, no por su masa o tamaño, sino por haber conservado durante miles de millones de años una combinación favorable de agua, atmósfera y procesos geológicos. Es posible que descubramos muchos planetas rocosos y que la mayoría se parezcan más a Venus o Marte que a la Tierra actual. Las futuras observaciones atmosféricas podrán poner a prueba esta posibilidad.

La segunda explicación es que la vida y las civilizaciones estén separadas por distancias enormes y que los viajes interestelares sean extraordinariamente difíciles. La radiación, los recursos energéticos, la duración de los trayectos y los límites físicos hacen que el desplazamiento de organismos biológicos resulte muy problemático. Podrían existir muchas «islas de vida» que apenas llegasen a comunicarse.

La tercera posibilidad es más inquietante: las civilizaciones tecnológicas podrían adquirir capacidades destructivas antes de alcanzar la madurez social necesaria para controlarlas. La existencia de armas termonucleares muestra que nuestra especie ya afronta ese riesgo. Es una cuestión que excede la astronomía, pero que merece una reflexión colectiva.

La búsqueda de vida y de civilizaciones no se reduce a escuchar señales. También consiste en conocer la diversidad planetaria, entender las atmósferas y reconstruir la historia de la vida. Aunque no podamos resolver todas estas preguntas inmediatamente, hemos empezado a convertirlas en problemas observables y contrastables.

Preguntas

¿No sería necesario que otro planeta reprodujera exactamente la historia de la Tierra, incluso en los tiempos, para que apareciera la vida?

Es una posibilidad, pero todavía no sabemos si la secuencia que permitió el origen de la vida terrestre fue única. Primero necesitamos comprender la química que hizo posible ese origen. Después podremos modificar experimentalmente las condiciones —temperatura, acidez, ingredientes, fuentes de energía— y comprobar cuánto margen existe. Sabemos producir diversos componentes orgánicos, pero no conocemos toda la cadena que conduce a un sistema vivo. La respuesta determinará si la vida requiere una coincidencia extremadamente precisa o si puede surgir por rutas diferentes. También podemos buscar huellas químicas o geológicas de actividad biológica en otros mundos.

¿Qué cambiaría para la humanidad saber que existe vida en otro planeta si no podemos viajar hasta allí ni comunicarnos?

El conocimiento tiene valor porque transforma nuestra comprensión del mundo y, con el tiempo, nuestras capacidades. La curiosidad y la investigación han impulsado avances que han mejorado la vida humana, aunque no siempre se conocieran sus aplicaciones al principio. Saber que no estamos solos tendría consecuencias profundas para nuestra visión de la naturaleza. No significa necesariamente que podamos visitar a otros seres o conversar con ellos: incluso en la Tierra la comunicación entre especies es difícil. También podría hacernos reflexionar sobre nuestra responsabilidad y sobre cómo usamos nuestro poder tecnológico.

¿Las extinciones masivas podrían favorecer la evolución y la expansión de la vida? ¿Podremos detectar planetas más pequeños combinando observaciones y telescopios?

Las extinciones alteran los ecosistemas y, en ocasiones, abren oportunidades para nuevas líneas evolutivas; la desaparición de los dinosaurios no avianos, por ejemplo, cambió las posibilidades de expansión de los mamíferos. Pero hoy nuestra especie está provocando pérdidas de biodiversidad de las que también es responsable. Respecto a la observación, el progreso depende de recoger más luz y mejorar la resolución. La combinación de señales y la interferometría permiten imaginar instrumentos cada vez más potentes. La interferometría ya funciona muy bien en radioastronomía; extender algunas de esas capacidades a otras longitudes de onda es un desafío técnico. En el futuro podríamos caracterizar planetas mucho más pequeños y estudiar mejor sus atmósferas.

¿Y si solo existieran una o dos civilizaciones tecnológicas por galaxia? ¿Sería prácticamente imposible encontrarlas?

Es una hipótesis compatible con algunas soluciones de la paradoja de Fermi. Las distancias entre galaxias son todavía mayores que las que separan las estrellas de la Vía Láctea, por lo que la detección y la comunicación serían mucho más difíciles. Podría ocurrir que las galaxias funcionasen, en cierto sentido, como islas aisladas y que solo hubiera unas pocas civilizaciones en cada una durante un período determinado. No tenemos datos suficientes para saberlo, pero es una posibilidad que ilustra por qué la ausencia de contacto no demuestra necesariamente la ausencia de vida.