



Ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

ASTROBIOLOGÍA

Marte en la Tierra: en busca de análogos marcianos

Meteoritos: portadores de los ingredientes de la vida

De lo simple a lo complejo: la química antes de la vida

Los océanos del sistema solar

Las huellas de la vida en el planeta rojo

El impacto del *nearshoring* en México: desafíos y oportunidades

Agua, desigualdad y medio ambiente en México: reflexiones desde la UAM Xochimilco sobre un problema creciente



CONSEJO DIRECTIVO

agosto 2023 – agosto 2026

Presidente

José Antonio Seade Kuri

Vicepresidenta

Telma Gloria Castro Romero

Tesorera

Gloria Soberón Chávez

Secretarios

Elva Guadalupe Escobar Briones

Sergio López Ayllón

Presidentes de las Secciones Regionales de la AMC

Sección Noreste: Gloria María González González

Sección Noroeste: María Teresa Viana Castrillón

Sección Centro-Occidente: Alejandro De las Peñas Nava

Sección Centro-Sur: José Ramón Eguibar Cuenca

Sección Sur-Sureste: Dalila Aldana Aranda











ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

abril-junio 2024 volumen 75 número 2

 Desde el Comité Editorial	3
<i>Alonso Fernández Guasti</i>	


Astrobiología

 Presentación	6
<i>Lilia Montoya y Elva Escobar-Briones</i>	
 Marte en la Tierra: en busca de análogos marcianos	8
<i>Ricardo Amils y Paola Molina Sevilla</i>	
 Meteoritos: portadores de los ingredientes de la vida	16
<i>Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz</i>	
 La atmósfera de Titán y el origen de la vida	22
<i>José de la Rosa Canales y Sebastián Mendoza-Téllez</i>	
 De lo simple a lo complejo: la química antes de la vida	28
<i>Betsaida Lucinda Ávila Suárez y Alejandro Heredia Barbero</i>	
 Los océanos del sistema solar	34
<i>Lilia Montoya y Elva Escobar-Briones</i>	
 La vida al extremo en la superficie de Marte	40
<i>Sandra Ignacia Ramírez Jiménez</i>	
 Las huellas de la vida en el planeta rojo	46
<i>José Alfredo Rojas Vivas, Pablo Martínez Sosa y Paola Molina Sevilla</i>	
 Mundos habitables más allá del sistema solar	52
<i>Antígona Segura</i>	
 Rafael Navarro: de la Tierra a Marte	60
<i>Antígona Segura y Christopher McKay</i>	

Novedades científicas

 Bacterias devoradoras de petróleo	65
<i>Odalys Julissa Ibarra-Alejos y René Ventura-Houle</i>	
 Insectos melíferos: no sólo las abejas producen miel	72
<i>Paula Sofía Villarreal Cantú</i>	

De actualidad

 El impacto del <i>nearshoring</i> en México: desafíos y oportunidades	76
<i>Sergio Silva Castañeda</i>	

Desde la UAM

 Agua, desigualdad y medio ambiente en México: reflexiones desde la UAM Xochimilco sobre un problema creciente	80
<i>Esthela I. Sotelo Núñez, coordinadora</i>	

Desde las redes

¡Hasta la vista, influenza!	90
Cuando los hombros de gigantes se desvanecen	91
El plástico puede movilizar tus células	92
<i>José Eduardo González Reyes</i>	

Noticias de la AMC



Portada: Pixabay.



Separador: Imagen generada utilizando Firefly (IA generativa de Adobe).

ciencia, revista de la Academia Mexicana de Ciencias, volumen 75, número 2, correspondiente a abril-junio de 2024, es una publicación electrónica trimestral, editada y distribuida por la Academia Mexicana de Ciencias, A. C., con domicilio en Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N, Col. San Andrés Totoltepec, Alcaldía Tlalpan, C. P. 14400, Ciudad de México, tel. 55 5849 4905, www.revistaciencia.amc.edu.mx, ciencia@unam.mx.

Editor responsable legal: Francisco Salvador Mora Gallegos. Número de Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título: 04-2001-072510183000-102, expedido el 25 de julio de 2001; ISSN 2954-5285, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Fecha de última modificación: 24 de marzo de 2023. Certificado de Licitud de Título y Contenido 17371, expedido por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación.

El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de sus autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Academia Mexicana de Ciencias. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa de la Academia Mexicana de Ciencias.

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias
abril-junio 2024 volumen 75 número 2

Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

Director

Alonso Fernández Guasti

Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero
Dalila Aldana Aranda
Raymundo Cea Olivares
Gabriela Dutrénit Bielous
Gerardo Gamba Ayala
Adolfo Guzmán Arenas
Juan Pedro Laclette San Román
Miguel Ángel Pérez de la Mora
Carlos Prieto de Castro
Sergio Sánchez Esquivel
Alicia Ziccardi Contigiani

Editora

Rosanela Álvarez

Corrección y enlace con autores

Leticia García Urriza

Social Media

José Eduardo González Reyes

Diseño y formación

Intidrinero, S.A. de C.V.

Ilustradora

Ana Viniegra, pp. 9, 17, 23, 29, 41, 47, 53
Pixabay: pp. 4, 7, 13, 15, 16, 20, 39, 44, 49, 54, 55, 58, 61, 70, 77, 78, 81, 84
Firefly (IA generativa de Adobe): pp. 64, 73

Red

Walter Galván Tejada

Academia Mexicana de Ciencias, A.C.

Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N,
Col. San Andrés Totoltepec, Del. Tlalpan, C.P. 14400, Ciudad de México
tel.: 55 5849 4905

www.revistaciencia.amc.edu.mx



@CienciaAMC

 **ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS**
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Este número de la revista *Ciencia* ha sido posible gracias al patrocinio de la



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Desde el Comité Editorial

Queridos lectores:

Muy bienvenidos a este nuevo número de la revista *Ciencia*. En esta ocasión la sección temática está dedicada a la astrobiología, área de estudio multidisciplinaria que incluye conocimientos de astronomía, especializada en el estudio de la génesis y evolución de galaxias y sistemas planetarios; la biología, que se ocupa del origen y evolución de los seres vivos; la geología, que investiga las características de los planetas, y la química, que estudia cómo se sintetizan las moléculas que forman a los seres vivos.

Gracias a los avances de la astronomía, ahora sabemos que el sistema solar y nuestro planeta no son únicos, lo que abre la pregunta: ¿existe vida en otros planetas? Los astrobiólogos han identificado tres requisitos indispensables para la supervivencia de los seres vivos: agua líquida, elementos químicos útiles para la síntesis de biomoléculas y una fuente de energía utilizable para las funciones básicas de los seres vivos. Si algún planeta o satélite cumple alguno de estos requisitos, se convierte en objeto de interés.

En el primer artículo se exploran diferentes ecosistemas terrestres que son análogos a las condiciones extremas que existen en Marte. Los microorganismos que viven en estas condiciones se llaman extremófilos y podrían existir en otros cuerpos planetarios. El estudio de las condiciones que permiten la habitabilidad es crucial para determinar los límites físicos y químicos dentro de los cuales puede existir la vida. Sigue leyendo y encuentra evidencia en favor de la teoría que indica que la vida en la Tierra provino de otros cuerpos celestes a través de meteoritos. En ese texto lee sobre hallazgos recientes que han reportado la presencia de aminoácidos, elementos esenciales para la vida, en el interior de algunos meteoritos.

¿Hay vida en alguna de las lunas de los gigantes gaseosos? Lee “La atmósfera de Titán y el origen de la vida” y descubre que en la atmósfera de este satélite se encuentran componentes que al combinarse forman moléculas orgánicas, como las que se piensa que dieron lugar a la vida en la Tierra. Además, Titán cuenta con los tres requerimientos para la vida: agua líquida, fuentes de energía y bioelementos. ¿Cómo se creó la vida en la Tierra? ¿Se formaron grandes moléculas orgánicas a partir de precursores pequeños e inorgánicos? ¿El mismo proceso puede ocurrir en otros planetas? Encuentra las respuestas en el artículo que estudia la química antes de la vida. La vida está compuesta por moléculas orgánicas, las que están formadas por átomos de carbono. El ambiente fisicoquímico en la Tierra primitiva fue suficiente para dar origen a moléculas orgánicas complejas. Sin embargo, aún desconocemos los mecanismos que llevaron a esas moléculas a formar “la vida”, es decir, a su orquestación que resultó en capacidad metabólica, adaptación al medio, obtención de información y capacidad de transmitirla. Parece claro que la vida se originó en los océanos hace unos 3 500 millones de años. ¿Es la Tierra el

único planeta donde hay océanos? No. Encélado, satélite de Saturno, y Europa, satélite de Júpiter, tienen océanos más grandes que los de la Tierra. Por tanto, la oceanografía ya no se restringe a la Tierra porque existen exo-océanos y éstos podrían presentarse también en otros cuerpos exteriores al sistema solar. ¿Tienen estos océanos las condiciones adecuadas para albergar vida?


La búsqueda de vida fuera de nuestro planeta se ha centrado en Marte. El planeta rojo es ahora seco, helado; sin embargo, es un buen candidato para pensar que pudo haber albergado vida en su superficie en el pasado y –quizás– aún la esconde en el subsuelo. En un par de artículos encuentra evidencias que apoyan esta idea. ¿Qué sucedería si una bacteria que requiere ambientes altamente salinos para vivir se pone en contacto con lodos enriquecidos en sales como los de la actual superficie del planeta rojo? En el texto que sigue halla argumentos para la posible identificación de vida en ese planeta. No existen huellas biológicas o moléculas orgánicas esenciales para la vida en la superficie marciana; sin embargo, se piensa que podría haber vida o restos de ella en capas más profundas del suelo. Marte no posee una capa de ozono que proteja su superficie; el mismo suelo podría funcionar como un escudo protector ante la radiación, preservando las posibles huellas de la vida a más de metro y medio de profundidad...

¿Existe vida en planetas más allá del sistema solar? Hemos detectado más de 5 mil exoplanetas que nos han maravillado con su diversidad y nos preguntamos si entre ellos habrá alguno que sea habitable. Requerimos estrategias que nos permitan identificar esos mundos para la posible detección de vida. Por primera vez tendremos la posibilidad de saber si a nuestro alrededor hay mundos habitables y habitados. Todo esto en el texto titulado: “Mundos habitables más allá del sistema solar”.

El último artículo de la sección temática está dedicado a la memoria de Rafael Navarro, biólogo mexicano. Su curiosidad lo condujo a estudiar la posibilidad de que exista vida en otros lugares del sistema solar. Marte fue su mundo favorito y gracias a su investigación la NASA modificó sus planes, detectando por primera vez compuestos de carbono en dicho planeta que confirman su potencial para generar vida.

En este número de la revista *Ciencia* encuentra dos Novedades Científicas. En la primera, lee sobre bacterias





devoradoras de petróleo. Se trata de organismos capaces de limpiar el agua y el suelo de contaminantes producidos por derrames de petróleo y de contribuir así a la recuperación del ambiente. La biorremediación es una estrategia para la restauración de sitios contaminados. Es importante conocer la forma en que trabajan las bacterias para generar la biorremediación.

En “Insectos melíferos: no sólo las abejas producen miel”, entérate de que existen ciertas especies de avispas y hormigas productoras de miel que también juegan un papel importante en las sociedades humanas. Por ejemplo, en América las abejas nativas sin aguijón nos brindan miel y tienen un importante valor económico, histórico y cultural. Desafortunadamente, sus poblaciones están disminuyendo a causa del cambio climático, los pesticidas y la introducción de especies exóticas.

¿Qué es el *nearshoring*? ¿Impacta importantemente a México? Nuestro texto en la sección De Actualidad aborda este tema. El *nearshoring* implica trasladar procesos productivos a lugares cercanos a mercados principales. Favorece significativamente a México por estar en la vecindad de los Estados Unidos, pero conlleva también retos profundos, sobre todo en el crecimiento sostenible y equitativo, y en el cuidado ecológico.

La crisis del agua y su impacto en la vida de las personas ya son una condición innegable. En el último artículo que nos hicieron llegar nuestros amigos de la UAM lee sobre este tema. Asistimos a una crisis global del agua con consecuencias sociales y económicas que se han vuelto uno de los problemas acuciantes del mundo. ¿Cómo ha de enfrentar México esta problemática? Este texto transdisciplinario busca aportar un entendimiento integral del problema del agua y su relación con el bienestar social y ambiental. Lograr que cada persona cuente con agua segura es un desafío. ¿Qué nos ha conducido a la crisis hídrica actual?: los procesos de deterioro ambiental, el impacto negativo de las actividades humanas, la falta de sistemas de tratamiento, la intensificación de fenómenos naturales extremos (sequías e inundaciones), la mala planeación del uso del territorio, las desigualdades sociales y la pobreza.

Disfruta de este número de la revista *Ciencia* que producimos especialmente para ti.

ALONSO FERNÁNDEZ GUAISTI
Director

Lilia Montoya y Elva Escobar-Briones
(Editoras huéspedes)



Presentación

ASTROBIOLOGÍA

¿Cuál es el origen de la vida?, ¿cómo ha sido su evolución? Éstas y otras interrogantes han inquietado a la humanidad en diferentes culturas y épocas. Como consecuencia de la observación del espacio estrellado, los seres humanos se han preguntado si existe vida más allá de la Tierra, y aunque al momento no existe evidencia, no podemos concluir que no la haya. Se trata de un tema con muchas aristas, que ha venido abordándose de manera multidisciplinaria en las comunidades científicas internacionales y que desde hace décadas ha generado un gran interés en grupos académicos del país. En especial, durante las últimas tres décadas la innovación de instrumentos de exploración, el crecimiento de cuadros técnicos especializados, así como los nuevos conocimientos científicos en diferentes disciplinas han hecho posible que la astrobiología adquiriera una importante presencia y aceptación.

Las observaciones sistemáticas de nuestro planeta, en particular de sitios con condiciones donde sabemos que la vida se originó y evolucionó, nos sorprenden con nuevos descubrimientos. Lo mismo que las observaciones del universo desde la Tierra a través de redes de telescopios cada vez de mayor alcance y resolución, o mediante misiones de exploración espacial. El desarrollo de sensores remotos ha permitido la búsqueda de agua en más de 5 000 exoplanetas, entre muchos miles más que hay por descubrir; de modo que, con el apoyo de la ciencia, se espera que sea posible conocer sus condiciones y determinar si son viables para la vida, según la conocemos.

A la reflexión sobre el inicio de la vida desde la perspectiva filosófica y a las observaciones realizadas por la astronomía y la astrofísica, hoy se suman conocimientos de otras disciplinas, como la microbiología, las ciencias biológicas, las ciencias de la Tierra y la biogeoquímica. Desde todos estos ámbitos los especialistas aplican sus conocimientos para proponer hipótesis que permiten determinar la habitabilidad de planetas, lunas y otros cuerpos celestes. Estas investigaciones retroalimentan a la astrobiología para entender el origen de la vida, descubriendo las formas que adopta ésta en condiciones extremas de la Tierra e indagando sobre las particularidades químicas del cosmos, en la búsqueda de vida más allá de nuestro planeta.

La compilación del contenido de esta sección temática tuvo como objetivo un primer acercamiento a los diferentes temas que estudia la astrobiología mediante contribuciones de grupos académicos, para comunicar los hallazgos y despertar el interés de los jóvenes y académicos de otras disciplinas. Algunos de los autores incluidos en ella se formaron incentivados por la investigación de colegas como Rafael Navarro González, o bien colaboraron con él en proyectos conjuntos y, al igual que él, todos ellos han buscado demostrar que la vida en la Tierra es un referente para interpretar los resultados de la investigación astrobiológica de Marte, o para encontrar y describir ecosistemas análogos con condiciones bioquímicas que hagan posible la vida en otros planetas.

Agradecemos sinceramente a nuestras y nuestros colaboradores por su dedicación en la preparación de estos trabajos; compartimos con ellos un sentido de pertenencia hacia esta fascinante ciencia que es la astrobiología. Expresamos también nuestro agradecimiento a Alonso, Leticia y Rosanela por su valioso apoyo editorial, así como al Comité Editorial de la revista *Ciencia* por la oportunidad de compartir estos contenidos con un público amplio, toda vez que hoy día resulta clara la importancia de la difusión de los hallazgos científicos para crear una sociedad capaz de dar solución, tanto a los problemas como a las preguntas que surgen en nuestro tiempo.



Ricardo Amils y Paola Molina Sevilla

Marte en la Tierra:

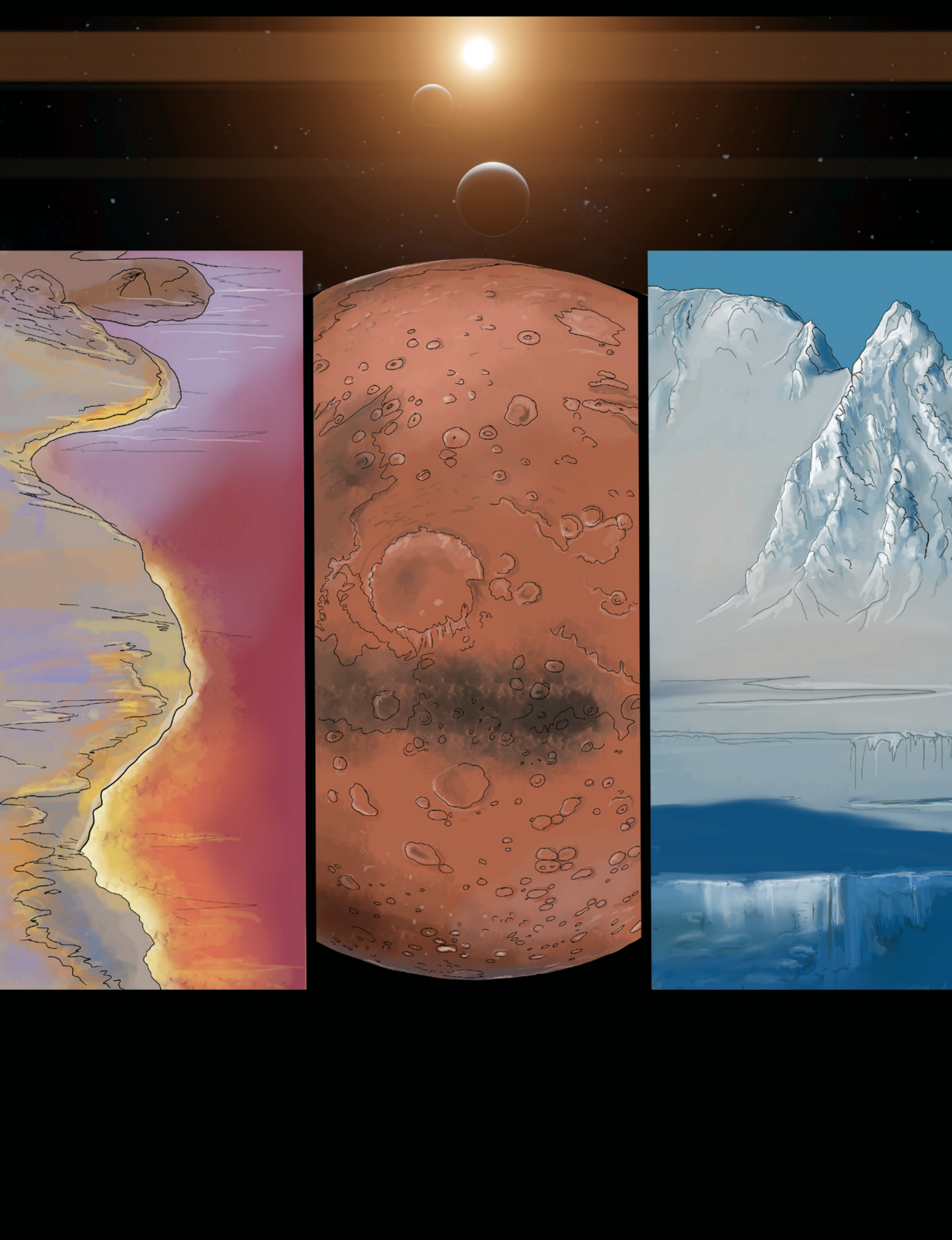
en busca de análogos marcianos

La exploración espacial en sus comienzos se basó en serendipia y conforme ha avanzado, se ha sistematizado. Una muestra es la búsqueda de sitios similares a los del paisaje marciano sobre la superficie de la Tierra, cuya historia geológica ayuda a entender la evolución planetaria y a conjeturar la habitabilidad de Marte. A estos lugares se les conoce como *análogos marcianos*.

Introducción

A finales del siglo XIX, muchos astrónomos veían un gran potencial en Marte como planeta habitable por las evidencias recabadas en sus grandes telescopios, como lo fue el descubrimiento de Giovanni Schiaparelli en 1887, quien observó figuras que semejaban cauces de ríos y las denominó *canali*; sin embargo, por una mala traducción se interpretó como una red hidráulica artificial diseñada por una civilización avanzada, lo que avivó en el ideario de la gente la creencia de que en Marte había vida. Las primeras imágenes tomadas por las misiones Mariner mostrarían, no obstante, una superficie llena de cráteres que recordaba más a la Luna, fría y estéril.


Con todo y las claras evidencias de la inexistencia de una civilización avanzada, surge la misión espacial Viking en 1968, la única en tener como objetivo la búsqueda e identificación de vida microbiana en Marte, por medio de una serie de experimentos para detectar actividad metabólica y un experimento que podía caracterizar los componentes orgánicos, además de ser capaz de diferenciarlos de aquellos producidos sin intervención de seres vivos, llamados abióticos. Este último experimento consistía en tomar suelo marciano y calentarlo en una atmósfera inerte, separar los gases producidos por cromatografía de gases e identificarlos por espectrometría de masas. Para poder indicar la fuente de dichos componentes orgánicos, probar la instrumentación y facilitar la interpretación de los resultados, se utilizaron cultivos bacterianos, sedimentos del precámbrico, meteoritos, suelos agrícolas y sedimentos del desierto de Mojave, California, como el ambiente desértico más parecido a Marte.



Los resultados de la misión Viking dejaron una importante huella en la exploración espacial, aunque mientras los experimentos de metabolismo mostraban actividad microbiana, la instrumentación encargada de detectar y caracterizar componentes orgánicos no fue capaz de hacerlo. Para probar el método se utilizaron muestras de los Valles Secos de la Antártida, en donde se detectaron varios compuestos orgánicos, evidenciando que los métodos y la instrumentación habían funcionado.

A pesar del ambiente inhóspito de los Valles Secos, se determinó también la existencia de una gran variedad de bacterias y algas, que llevó a los científicos a cuestionar cuáles podrían ser los límites para la vida y si este lugar que mostraba una fisiografía muy similar a la de Marte lo era también en relación con la actividad biológica. Se incentivó así la búsqueda de sitios para probar la instrumentación, generando a la par una redefinición de los sitios análogos a Marte.

 **Sitios análogos, definición cambiante**

 La Antártida es un desierto polar que en la época del Viking fue el mejor análogo debido a su topografía, su bajo campo magnético y alta velocidad de los vientos. La precipitación y la temperatura son tan bajas que la nieve al calentarse se sublima en vapor de agua y se disocia en átomos de oxígeno e hidrógeno debido a los rayos ultravioleta del Sol y el ozono, tal como ocurre en Marte, de ahí que la definición de un análogo marciano se expresó como aquel sitio en la Tierra cuyas condiciones ambientales, características geológicas, atributos biológicos —o una combinación de éstos— se aproxima a los esperados y observados en Marte.

A finales de los 90 del siglo pasado, la misión Pathfinder halló indicios de un ambiente acuoso en la superficie marciana, lo que motivó el desarrollo de misiones más eficientes y el requerimiento de ambientes para probar la instrumentación y que ayudaran a entender los procesos geológicos operantes en Marte. De acuerdo con estos requerimientos, Jeffrey Marlow propone clasificar a los análogos marcianos de acuerdo con las siguientes categorías: químicos, mecánicos, físicos, magnéticos y orgánicos.


A pesar de representar de manera parcial a los ambientes extraterrestres, los análogos participan en las diferentes etapas de una misión espacial y han tomado tanta relevancia que en 2021 se han presentado definiciones en relación con su relevancia, usos y límites:

1. Sitios usados por su analogía planetaria: sirven para explicar procesos geológicos extraterrestres, para lo cual se examinan las estructuras geológicas, la geomorfología y el paisaje.
2. Sitios usados por sus procesos mecánicos: permiten estudiar los procesos de alteración química, mecánica, hidrotermalismo, metamorfismo, intemperismo (degradación de las rocas por factores físicos o químicos) e impactos, para explicarlos en ambientes extraterrestres.
3. Sitios usados por su petrografía y mineralogía: su utilidad reside en que permiten estudiar la formación mineral y su identificación en ambientes extraterrestres.
4. Sitios de interés astrobiológico: sirven para el estudio del metabolismo en condiciones análogas y de bioseñales de vida presente o pasada.
5. Sitios análogos para ingeniería: permiten probar la instrumentación de los vehículos y el entrenamiento de astronautas.

Actualmente, se han descrito diversos sitios como análogos terrestres de Marte. En este escrito, hemos seleccionado los tres mejores, puesto que han aportado pistas contundentes sobre la presencia de agua líquida, el pasado de Marte y sus posibilidades de albergar vida.

 **Principales sitios análogos para estudiar Marte**

 *Río Tinto, posibilidades de vida en Marte*

 La misión Pathfinder (1997) detectó ambientes donde fluyó agua sobre la superficie marciana. Para obtener evidencias en este sentido, se diseñaron los vehículos robóticos de exploración *in situ* Spirit y Opportunity, cuyo objetivo fue detectar minerales de hierro que sólo se forman en interacción con el agua. Para probar la instrumentación y dar una inter-

pretación a los resultados de la misión, fue necesario encontrar un ambiente acuoso con altas concentraciones de hierro; ese sitio se encontró en España, al suroeste de la península ibérica, en Huelva, en la cuenca del Río Tinto.

La cuenca del Río Tinto alberga el mayor depósito de sulfuros masivos del mundo (la Faja Pirítica ibérica), contiene altas concentraciones de sulfatos y óxidos de hierro, cuyos minerales más representativos son la hematita y la jarosita, minerales que fueron detectados en las zonas de estudio del robot Opportunity. Esto fue significativo porque la presencia de jarosita se asocia a un medio altamente alterado por el agua; esto es, se genera en ambientes sumergidos. Por su parte, la hematita se forma como un precipitado en agua líquida y la acción del vulcanismo, de modo que se consideró que la hematita “podría ser un indicador mineral de agua del pasado”. Saber cómo se formó en Marte la hematita puede ayudar a

caracterizar su historia pasada y determinar si mantuvo las condiciones favorables para la vida.

El Río Tinto muestra un complejo ecosistema a pesar de que sus aguas son extremadamente ácidas (pH entre 1.7 y 2.7) y están cargadas de hierro oxidado (Fe^{3+}), lo que le da su característico color rojo y son consecuencia de los procesos biológicos de microorganismos que crecen en los depósitos de sulfuros metálicos. Esto abre la posibilidad de que ambientes similares de Marte puedan haber albergado vida microbiana (véase la Figura 1). Estos descubrimientos muestran que el Río Tinto (Huelva) es un laboratorio natural que recrea Marte en la Tierra, tanto que sus características geológicas son muy similares a la región Meridiani Planum de Marte en la era Noeica, la más antigua de los tres periodos en que se ha dividido la historia de Marte. Además, la jarosita y la hematita son minerales que pueden preservar la materia orgánica y, por tanto, posibles restos de vida. A

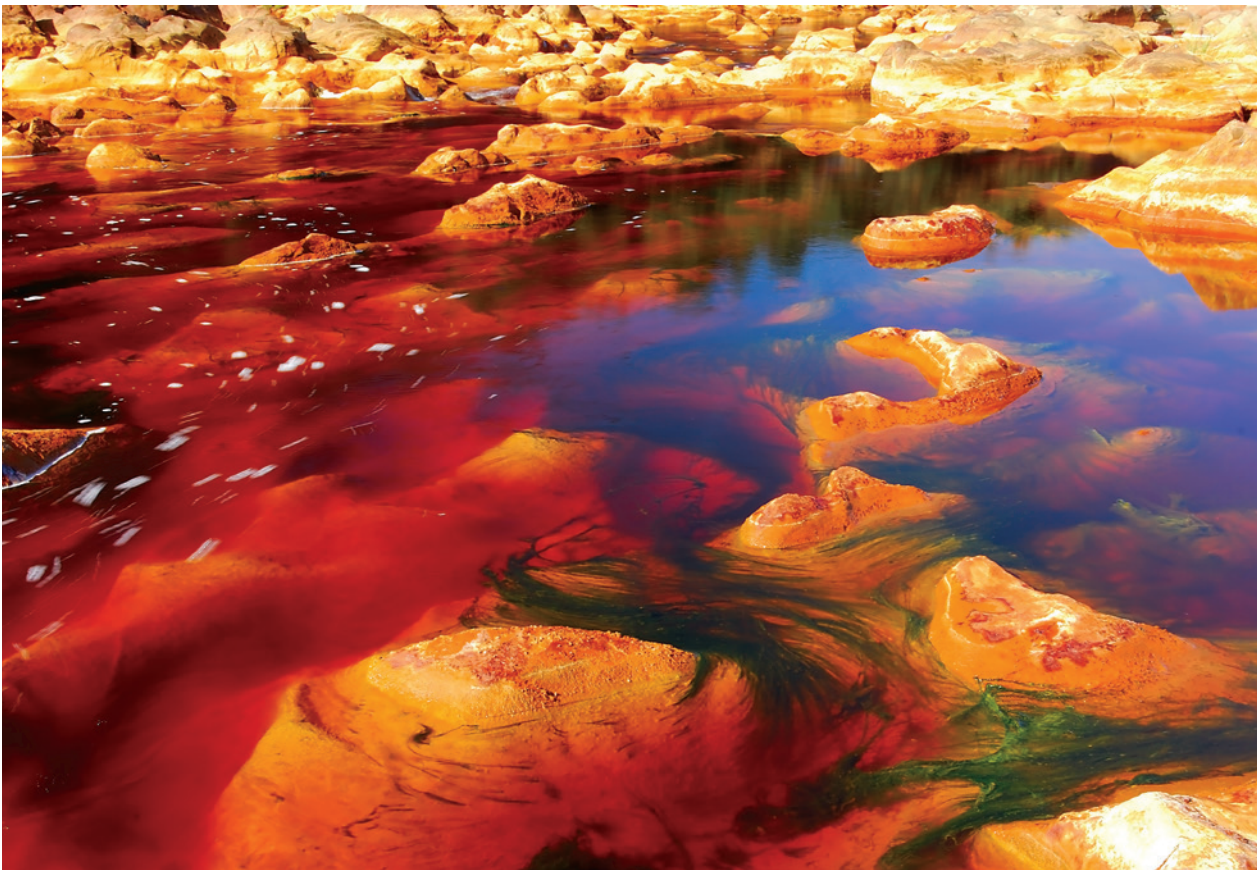


Figura 1. Fotografía que muestra una parte del cauce del Río Tinto con su característico color rojo. Se puede apreciar la presencia de algas filamentosas. Crédito: Julio Segura.

partir de estos descubrimientos también se va construyendo la historia climática de Marte.

Recientemente se ha podido demostrar que el origen de las condiciones extremas de la cuenca del Tinto se deben a un biorreactor subterráneo capaz de promover la oxidación del hierro en **condiciones anóxicas**. La demostración de vida en el subsuelo profundo de la Faja Pirítica ibérica ha reactivado el interés de buscar vida en el subsuelo marciano, circunstancia que las condiciones actuales existentes en la superficie imposibilitarían.

Atacama, el Marte del presente

El corazón del desierto de Atacama en Chile se considera la zona más hiperárida del planeta y por consecuencia casi estéril, a pesar de ser un desierto templado. La evidencia geológica y mineralógica sugiere que la zona más árida del desierto ha permane-

cido así por más de 10-15 millones de años, lo que lo hace el desierto más antiguo del mundo. Ocasionalmente hay ingreso y condensación de neblina que se conoce como *camanchaca*. Su hiperaridez se debe a los efectos combinados de un sistema de alta presión en el oeste del Pacífico junto con el efecto secante del flujo frío de las corrientes oceánicas de Humboldt con dirección norte, y un efecto de barrera debido a la cordillera de la costa, por el oeste, y a la cordillera de los Andes, al este, que evita el paso de nubes.

A partir de una publicación de la revista *Science* en 2003, se ha considerado que los suelos del desierto de Atacama podrían ser similares a los de Marte, debido al ambiente altamente oxidante y la escasa actividad biológica, que trae como consecuencia la acumulación de nitratos, la deposición de ácidos y la baja concentración de material orgánico (Figura 2).

Condiciones anóxicas

Se dice de los ambientes con ausencia de oxígeno.



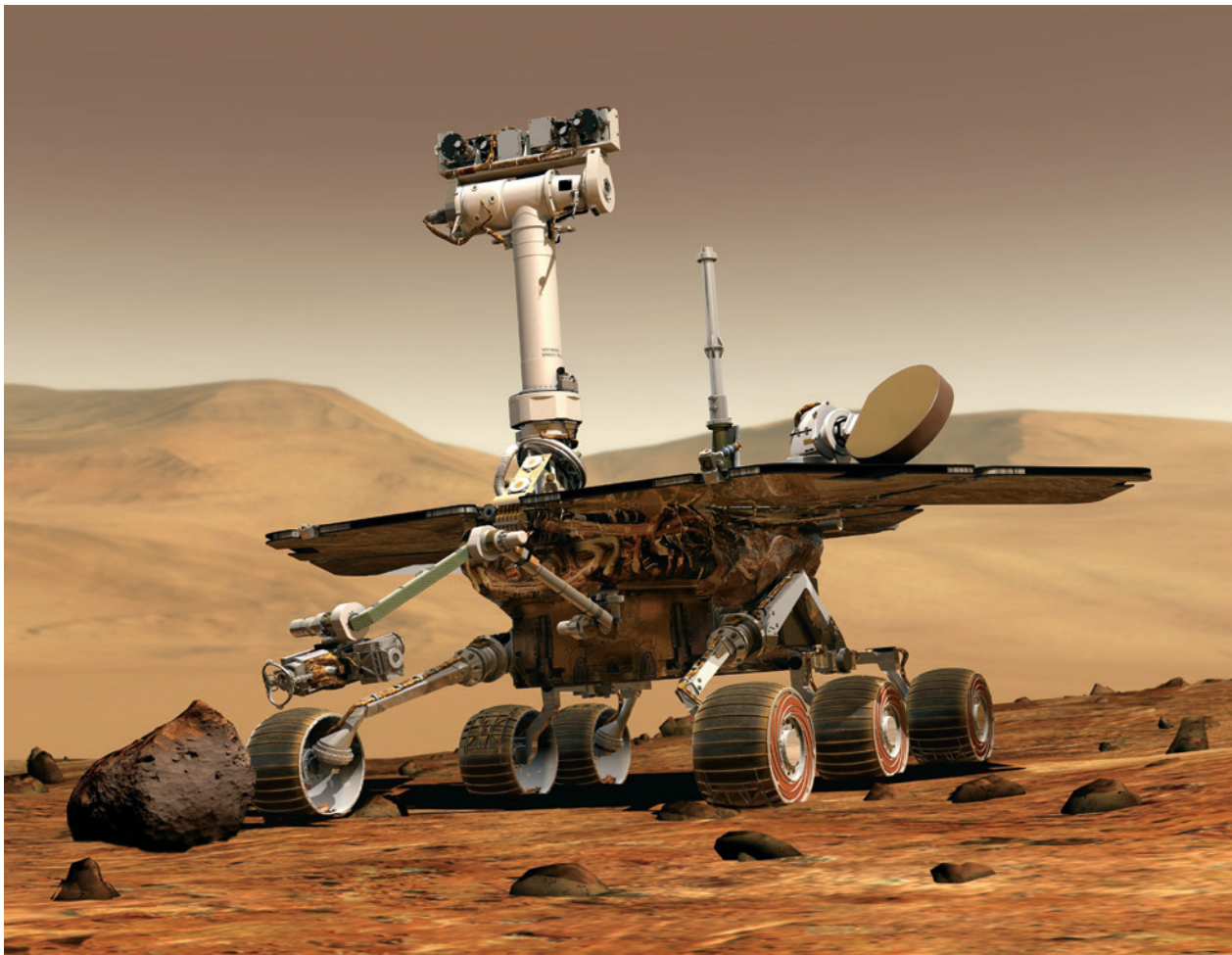
Figura 2. Las rocas y la arena caracterizan el corazón del desierto de Atacama. No hay presencia de vida macroscópica. Crédito: Navarro Team.

En 2008, la misión Phoenix detectó percloratos en el suelo marciano, y según las pruebas con los suelos del desierto de Atacama, en presencia de estos componentes químicos era imposible detectar material orgánico con las técnicas usadas por la misión Viking. Estos resultados, más el estudio de la degradación de la materia orgánica en estos suelos, han sido determinantes para preparar futuras misiones.

Dalol, los límites de la vida en la Tierra

Los microorganismos se pueden encontrar donde existe agua líquida y fuentes metabólicamente adecuadas de carbono, energía y nutrientes. Sin embargo, ante cambios drásticos en su entorno, su integridad celular puede verse comprometida en condiciones físicas y químicas extremas (temperatura, presión, salinidad, pH, potencial redox, entre otros). Los microorganismos que viven en presencia

de tales desafíos se denominan extremófilos y se han adaptado fisiológicamente para vivir en condiciones adversas. Esta capacidad de colonizar cualquier hábitat terrestre podría ser viable en otros cuerpos planetarios. Por lo tanto, el estudio de los procesos geológicos en ambientes extremos, junto con la habitabilidad, juegan un papel crucial en la determinación de los límites físicos y químicos dentro de los cuales puede existir la vida en la Tierra. Adicionalmente, la filogenia –encargada del estudio de la evolución de las especies hasta ahora conocidas en la Tierra– indica que provenimos de un ancestro común y que las primeras formas de vida temprana habrían habitado un entorno termófilo (cálido), en océanos ricos en iones metálicos, carentes de oxígeno (anaerobiosis), con lo que se propone a los sistemas hidrotermales asociados con actividad volcánica submarina, o aguas termales terrestres, como



entornos en los que surgió la vida. A partir de estas propuestas, se ha incrementado el interés de estudiar Marte, pues su fisiografía muestra que en su pasado hubo actividad volcánica e hidrotermal sobre su superficie, debido a la presencia de agua líquida.

De nueva cuenta, es necesario encontrar ambientes análogos donde podamos estudiar formas de vida en condiciones extremas que se asemejen al pasado de Marte. La zona de Dallol, la cual se encuentra en una remota región de Etiopía y es parte de la depresión de Danakil, presenta un excelente ambiente similar al de Marte. Dentro de ella se encuentra un campo hidrotermal con actividad volcánica. Esta zona está rodeada por una amplia e hiperbárica llanura de sal, con ambientes naturales muy cálidos (36-38 °C) y pH cercano a cero, lo cual los hace los más ácidos de la Tierra. Las espectaculares geomorfologías y depósitos minerales producidos por aguas hidrotermales sobresaturadas y **salmueras** son el resultado de interacciones complejas entre la alteración hidrotermal activa e inactiva del lecho rocoso, fuentes y piscinas termales sulfúricas, fumaro-

Salmueras
Cuerpos de agua con altas concentraciones de sal.

las y géiseres, así como procesos de recristalización impulsados por aguas hidrotermales, desgasificación y evaporación rápida (Figura 3). La diversidad de hábitats presentes en Dallol lo hacen un lugar único que puede servir como un laboratorio natural para explorar ambientes para la vida temprana, estudiar los mecanismos de adaptación en genes, proteínas, membranas y ácidos nucleicos en condiciones extremas, donde podamos dilucidar los principios de supervivencia y adaptación, como la termoestabilidad que utilizan los extremófilos para conservarse y de la cual aún no existe una comprensión integral. La zona de Dallol nos da la oportunidad de proponer entornos en los que podría existir vida extraterrestre, definir firmas biológicas, así como el diseño de instrumentación científica para la detección de vida.

Reflexiones finales

Después de los polémicos resultados que obtuvo la misión Viking, no había instrumentación que diera cuenta de la existencia de material orgánico ni que



Figura 3. Fotografía de una de las pozas en la zona de Daloll, cuyos colores se deben a depósitos de hierro en distinto estado de oxidación. Crédito: Nuria Rodríguez.



determinara la existencia de vida en Marte. En dicha época fue necesario valerse de ambientes que ayudaran a entender los fallos de la misión y que hoy en día se han vuelto esenciales no sólo para probar instrumentación, sino que han ayudado a reconstruir el pasado climático de Marte, reconocer sitios de mayor interés astrobiológico, así como nuevos mecanismos para la búsqueda de vida no sólo en el planeta rojo.

Ricardo Amils

Unidad de Microbiología Aplicada-Centro de Biología Molecular Severo Ochoa, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid.

ramils@cbm.csic.es

Paola Molina Sevilla

Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM.

paolams@ciencias.unam.mx

Lecturas recomendadas

Navarro-González, R. (2006), “Marte en el Desierto de Atacama”, *Ciencia*, 57(1):5-9.

Herrán, J. de la (2003), “Marte más cerca que nunca”, *¿Cómo ves?*, 57, DGDC-UNAM. Disponible en: <<https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/57/marte-mas-cerca-que-nunca>>.

Valdivia-Silva, J. y G. Cordero-Tercero (2022), “Astrobiología en Marte”, en L. Montoya-Lorenzana, G. Cordero-Tercero y S. Ramírez-Jiménez (comps.), *Astrobiología. Una visión transdisciplinaria de la vida en el universo*, México, FCE/UNAM/ICN.

Amils, R., D. Fernández-Remolar y The IPBSL Team (2014), “Río Tinto: A geochemical and mineralogical terrestrial analogue of Mars”, *Life*, 4(3):511-534.

Amils, R. *et al.* (2023), “Coupled C, H, N, S and Fe biogeochemical cycles operating in the continental deep subsurface of the Iberian Pyrite Belt”, *Environmental Microbiology*, 25:428-453.

Calavazzi, B. *et al.* (2019), “The Dallol Geothermal Area, Northern Afar (Ethiopia)—An exceptional planetary field analog on Earth”, *Astrobiology*, 19(4):553-578.

Marlow, J. J. *et al.* (2008), “Mars on Earth: soil analogues for future Mars missions”, *Astronomy & Geophysics*, 4(2):20-23.

Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz

Meteoritos: portadores de los ingredientes de la vida

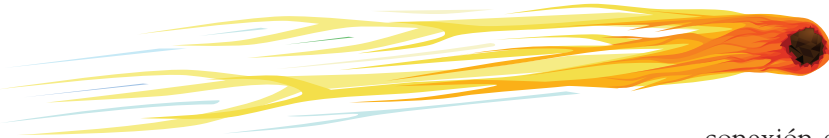
Hace apenas dos siglos que un joven científico francés, Jean-Baptiste Biot, aportó la primera evidencia de que los meteoritos tenían un origen extraterrestre, que podían venir de asteroides o de otros cuerpos celestes. Fue hasta 2006 que la misión Hayabusa confirmó esa hipótesis cuando regresó con muestras del asteroide Itokawa, idénticas a los meteoritos llamados condritas. Las condritas son clave para entender los bloques que dieron origen a la Tierra y a la vida.

La fundación de la meteorítica

Los meteoritos son rocas que caen sobre la superficie de nuestra Tierra, haciendo una entrada triunfal y espectacular. La fragmentación de los asteroides y meteoroides que entran a la atmósfera produce una serie de luces de colores, estelas de polvo y grandes estruendos que anuncian su llegada a la superficie. Los asteroides son rocas de más de un metro de diámetro, que orbitan alrededor del Sol y que provienen principalmente del cinturón de asteroides, mientras que los meteoroides también son rocas viajeras, pero con un tamaño menor a un metro. Cuando un evento meteorítico ocurre, las redes sociales estallan y quien presenció el evento, o lo grabó, no tarda en compartirlo. Los comentarios de todo

tipo no se hacen esperar, desde memes que anuncian la llegada de Superman, hasta quienes dicen lo que realmente pudo haber ocurrido. La

conexión entre fragmentos de asteroides o de superficies planetarias con los meteoritos es ahora la explicación más lógica para este fenómeno. Sin embargo, fue hasta finales del siglo XVIII cuando Ernst Chladni reunió evidencias suficientes para proponer que los meteoritos eran realmente rocas extraterrestres; pero no le creyeron. A inicios del siglo XIX Jean-Baptiste Biot constató que el meteorito de la provincia francesa de L'Aigle era una roca que había caído del cielo, así que en 1803 se funda una nueva ciencia conocida como *meteorítica*.





La condrita Alais, 1806

Pasaron varios años antes de comprobar que los ingredientes básicos para la vida estaban contenidos en los meteoritos. Dichos ingredientes son: carbono, oxígeno, hidrógeno, azufre y fósforo. De acuerdo con la investigación histórica de Ursula Marvin, fue una tarde de 1806 cuando en la comunidad francesa de Saint-Étienne-de-l'Olm, una familia de granjeros escuchó unas estruendosas detonaciones y presenciaron el bombardeo de unos pedruscos sobre un campo de cultivo. La roca no contenía las esferas milimétricas características de las condritas, las cuales representan el 86% de los meteoritos que se ven caer, aunque 98 años después se darían cuenta de que la composición química guardaba similitud con lo que hoy conocemos como condritas carbonosas de tipo Ivuna o condritas CI (véase la Figura 1). Lo que sí, en 1806 el profesor de química del Collège de France, Louis Jacques Thénard (1777-1857), se dio cuenta de que el meteorito contenía alrededor de 2.5% en peso de carbono. Ésta fue la primera vez que se describió la presencia de carbono presunta-

mente extraterrestre y de minerales hidratados como las arcillas en un fragmento de cuerpo celeste caído sobre la Tierra. Sin embargo, la cromatografía de gases –que es una de las técnicas analíticas que permiten una caracterización más amplia de algunos compuestos orgánicos importantes como los aminoácidos– se estableció hasta 1955, fecha antes de la cual no se disponía de evidencia acerca de la presencia de compuestos orgánicos en meteoritos, más que nada porque el desarrollo analítico y los protocolos de cuartos ultralimpios para manipular el material aún no estaban disponibles. Así que, ¿cómo asegurar que la presencia de material orgánico no haya sido resultado de contaminación terrestre?

Condrita Murchison (el primer estudio de aminoácidos)

Los conocedores inmediatamente identificaron un olor similar al del alcohol metílico, después de ver una luz intensa que terminó en una nube alargada de polvo y de escuchar tres detonaciones que hicieron

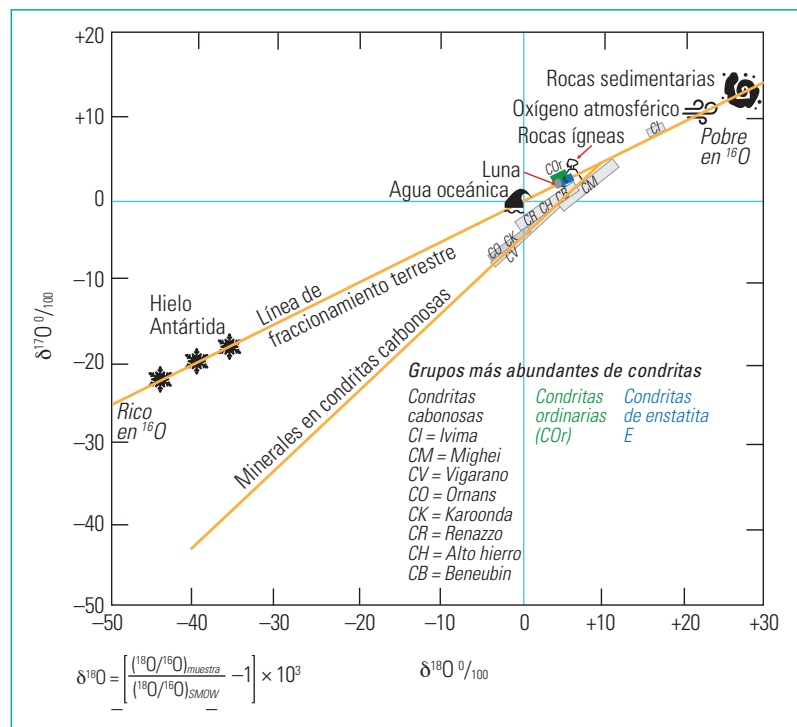



Figura 1. En la imagen se muestran las relaciones isotópicas de oxígeno para los diferentes grupos de condritas y la línea del fraccionamiento terrestre (TF) que conecta todos los materiales terrestres que tienen oxígeno. Ilustración realizada a partir de Greenwood y cols. (2023).

cimbrar la tierra. Así fue la caída del meteorito que se fragmentó sobre la población de Murchison, al suroeste del continente australiano, cerca de la ciudad de Melbourne. Según el portal del *Meteoritical Bulletin*, se encontraron cerca de 100 kg de fragmentos de una condrita carbonosa similar a la de Mighei, es decir tipo CM (Condrita Mighei). Eso lo convierte en la condrita carbonosa con mayor masa de su grupo. El olor a alcohol que continúa penetrando los frascos que contienen la roca indican la presencia de material orgánico. A dos años de la caída de Murchison, Kvenvolden y cols. (1970) utilizaron muestras del interior de algunos fragmentos grandes del meteorito y reportaron la presencia de aminoácidos con enantiómeros D y L; eso demostraba la procedencia extraterrestre, ya que los aminoácidos presentes en los seres vivos sólo contienen el isómero L. ¿Qué es esto de isómeros D y L? Si ves una foto tuya, el coque-to lunar de la mejilla derecha aparecerá a la izquierda y si lo comentas con tus amigos, te verán raro porque ellos siempre te ven así, mientras que la imagen que ves en el espejo en realidad es una imagen invertida de ti. Es decir, los enantiómeros tienen la misma composición química, pero por la disposición de sus átomos, cuando se hace pasar luz a través de ellos, polarizan la luz a la derecha (dextrógiros = D), o a la izquierda (levógiros = L). Otra prueba irrefutable del origen extraterrestre del material carbonoso del meteorito Murchison fue la firma isotópica del oxígeno, la cual es muy diferente a la firma típica de la vida en la Tierra, aunque esto lo veremos a detalle en la última sección.

Asteroides Itokawa y Ryugu

 Hace mucho tiempo, los jóvenes nos divertíamos saltando la cuerda; el truco estaba en entrar a saltar cuando la cuerda pasaba frente a ti con el fin de que ésta no te golpeará el cuerpo. Aunque la cuerda va a una velocidad alta, con un buen cálculo lográbamos acoplarnos a su ritmo. Algo similar pasó con la llegada de la primera misión japonesa, Hayabusa, que tuvo que acoplarse primero a la órbita del asteroide antes de posarse sobre la superficie del asteroide Itokawa, de acuerdo con el artículo publicado el 2

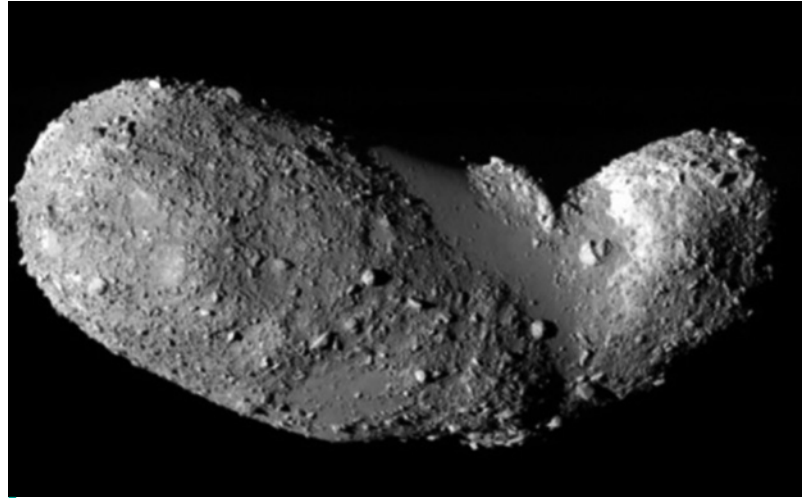


Imagen del asteroide Itokawa desde la nave Hayabusa. Crédito: ISAS, JAXA.

de junio de 2006 por Fujiwara y cols. en la revista *Science*. Las texturas de los meteoritos son como páginas que describen la historia de la formación, deformación e impactos que ocurrieron en el cuerpo parental, tal como lo describen Cervantes-de la Cruz y cols. (2010), pero la propuesta de que los cuerpos parentales de los meteoritos provenían de los asteroides era una mera especulación. La misión Hayabusa comprobó que los meteoritos condriticos sí vienen de los asteroides, el 20 de noviembre de 2005, cuando se posó sobre la superficie del asteroide Itokawa y logró traer muestras de regreso a la Tierra.

Tiempo después, otra misión, la Hayabusa 2, tomó muestras del asteroide Ryugu, el 22 de febrero y el 11 de julio de 2019, y regresó a la Tierra el 6 de diciembre de 2020, en plena pandemia de COVID-19. La misión la enviaron allí porque la superficie del asteroide se parecía a la de los meteoritos condriticos tipo Ivuna o CI (Figura 1), una clase muy antigua de meteoritos que guarda similitud composicional con la atmósfera de nuestro Sol. Lo más sorprendente es la cantidad de compuestos orgánicos no biógenos y minerales hidratados analizados en muestras que nunca se contaminaron en la Tierra. Por lo que, de acuerdo con lo reportado por Oba y cols. en la revista *Nature Communications* (2023), los aminoácidos no proteicos, el uracilo y muchos otros compuestos orgánicos contenidos en Ryugu son de origen extraterrestre.

La formación de la Tierra a partir de material condrítico

Muchas personas dicen que mi cara es similar a la de mi madre, pero mis dedos son como los de mi padre; eso me hace ser hija de mis padres, pues compartimos el mismo material genético. De la misma manera, los planetas conservan la huella de los materiales que los formaron. El material de los planetas terrestres está formado por compuestos que tienen oxígeno; por ejemplo, el material más abundante de los planetas rocosos son los silicatos, los cuales son una combinación de silicio con oxígeno y pueden contener alguno o varios de los elementos de la siguiente lista: hierro, magnesio, aluminio, calcio, potasio, etc. Un aspecto particular en el oxígeno es que tiene tres isótopos; es decir, átomos del mismo elemento con el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones en el núcleo. Esto hace que los isótopos de un elemento tengan diferente peso; por ejemplo, las masas atómicas de los isótopos de oxígeno son 16, 17 y 18. Es decir, el isótopo de oxígeno 16 tiene 8 protones y 8 neutrones ($8 + 8 = 16$), el 17 tiene 8 protones y 9 neutrones, mientras que el 18 tiene 8 protones y 10 neutro-

nes. Una particularidad que tienen estos isótopos es que son susceptibles a diferenciarse, es decir, a separarse por su masa dependiendo de condiciones físicas como la presión y la temperatura. Un ejemplo de diferenciación isotópica ocurre en las profundidades abismales del agua de los océanos (Figura 1), la cual es agua enriquecida en isótopos de oxígeno pesado; es decir, con oxígeno 18 (por ejemplo, las rocas sedimentarias del fondo marino de la Figura 1). Por otra parte, el agua que se evapora de la superficie del mar y que se almacena en los hielos de la Antártida tiene una mayor proporción de isótopos de oxígeno 16. De manera análoga, en el sistema solar interno abunda el isótopo más pesado, con respecto a los bordes del sistema solar, en donde en las condritas carbonosas abunda el isótopo de oxígeno más ligero. En el pie de la Figura 1 se muestra la manera de calcular la proporción de oxígenos 16, 17 y 18 con relación al estándar, que es el agua del mar (SMOW = Standar Mean Ocean Water); para calcular el $\delta^{17}\text{O}$ sólo se sustituye el isótopo de ^{18}O por ^{17}O .

En la Figura 1 se observa una línea que se llama “línea del fraccionamiento terrestre de los isótopos de oxígeno”, en donde todos los compuestos terrícolas



con oxígeno caen sobre esa línea; es decir, desde el agua contenida en el océano, la atmósfera, hielos, rocas y hasta las rocas de la Luna. De hecho, ésta es una de las características principales que ligan al blanco satélite de nuestro cielo con la Tierra, derivado del impacto de la proto-Tierra y un embrión planetario llamado Theia (Figura 1). En esta línea vemos también que se grafican dos grupos de condritas: las condritas de enstatita y las condritas carbonosas tipo Ivuna o CI. Las condritas carbonosas CM, como la Murchison, aparecen en otra sección del diagrama y otros grupos de meteoritos también.

Esto sugiere que la Tierra está formada por este tipo de materiales condriticos. Ya sea que el material de las condritas carbonosas haya llegado antes o después de la formación del sistema Tierra-Luna, lo cierto es que la evidencia sugiere que los bloques que contenían los ingredientes de la vida fueron los mismos bloques que formaron nuestro hogar, la Tierra. Por lo que, al final, Carl Sagan tenía toda la razón, “estamos hechos de polvo de estrellas”.

La autora agradece al Conahcyt por el apoyo del proyecto Fronteras de la Ciencia (núm. 1530) y al proyecto PAPIIT IN117619. Se reconoce el trabajo de los revisores que contribuyeron al mejoramiento del texto y el trabajo de las editoras invitadas, la Dra. Elva Escobar y la Dra. Lilia Montoya.

Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz

Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, UNAM.
kcervantes@encit.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Cervantes de la Cruz, K. E. *et al.* (2010), “Termometría de dos piroxenos en condros de la condrita ordinaria Nuevo Mercurio H5, México”, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27(1):134-147. Disponible en: <http://www.rmccg.unam.mx/index.php/rmccg/article/view/727>.
- Fujiwara, A. *et al.* (2006), “The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa”, *Science*, 312(5778):1330-1334. Disponible en: doi.org/10.1126/science.1125841.
- Greenwood, R. C. *et al.* (2023), “Oxygen isotope evidence from Ryugu samples for early water delivery to Earth by CI chondrites”, *Nature Astronomy*, 7(1):29-38. Disponible en: doi.org/10.1038/s41550-022-01824-7.
- Kvenvolden, K., J. Lawless, K. Pering, E. Peterson, J. Flores *et al.* (1970), “Evidence for extraterrestrial amino-acids and hydrocarbons in the Murchison meteorite”, *Nature*, 228(5275):923-926. Disponible en: doi.org/10.1038/228923a0.
- Marvin, U. (2006), “Meteorites in history: an overview from the Renaissance to the 20th century”, en G. J. H. McCall, A. J. Bowden y R. J. Howart (eds.), *The History of Meteoritics and Key Meteorite Collections: Fireballs, Falls and Finds*, Geological Society, Londres, 256(1):15-71. Disponible en: doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.256.01.02.
- Oba, Y., T. Koga, Y. Takano, N. O. Ogawa, N. Ohkouchi *et al.* (2023), “Uracil in the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu”, *Nature Communications*, 14(1):1292. Disponible en: doi.org/10.1038/s41467-023-36904-3.
- Righter, K. y D. P. O'Brien (2011), “Terrestrial planet formation”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(48):19165-19170. Disponible en: doi.org/10.1073/pnas.1013480108.

José de la Rosa Canales y Sebastián Mendoza-Téllez

La atmósfera de Titán y el origen de la vida

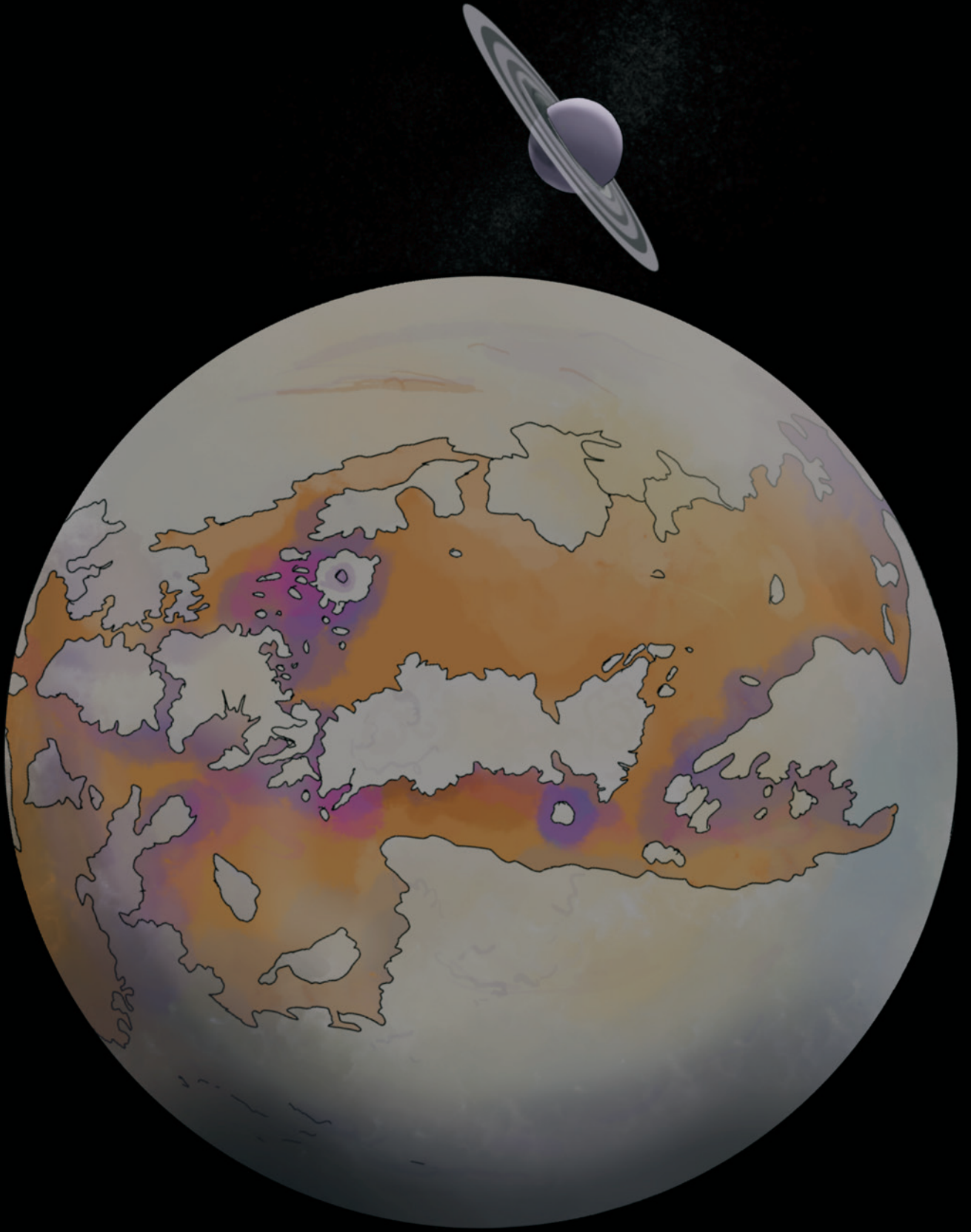
Titán, la luna más grande del planeta Saturno, ha sido visitada por varias misiones espaciales, entre ellas la Voyager 1 y la Cassini-Huygens, gracias a lo cual actualmente es posible asegurar que sus componentes atmosféricos se combinan para formar moléculas orgánicas, como las que se piensa que eventualmente condujeron a la vida en la Tierra. Revisemos por qué vale la pena mandar una nueva misión espacial a Titán.

Luna Saturni

Todos hemos escuchado hablar de Saturno, un planeta gigante y gaseoso que se encuentra en las lejanías de nuestro sistema solar; sin embargo, pocos saben que está acompañado de Titán, su satélite natural más grande, una luna impresionante en donde se presentan fenómenos atmosféricos muy familiares para los humanos.

Titán fue descubierto accidentalmente en 1665 por el astrónomo holandés Christiaan Huygens, quien lo llamó *Luna Saturni*. El astrónomo neerlandés estaba tratando de estudiar con su telescopio, a profundidad, los anillos de Saturno, descubiertos por Galileo Galilei en 1610, cuando observó un punto muy característico que rodeaba a Saturno: Titán, una de las 146 lunas conocidas hasta el momento de Saturno. Titán se encuentra 9.5 veces más alejada del Sol que la Tierra, su periodo de rotación es de 16 días terrestres y el de traslación es de 30 años terrestres, y su tamaño es casi el del planeta Mercurio, por lo que se considera un cuasi planeta.

¿Qué hace tan especial a Titán? En 1944 Gerard Kuiper, astrónomo neerlandés nacionalizado estadounidense, observó que el satélite tenía una atmósfera densa que se parecía mucho a la de la Tierra. Este descubrimiento desató el interés de los investigadores, sobre todo de la NASA, de que se considerara al satélite como un destino para futuras misiones espaciales. Es importante mencionar que antes de 1980 se pensaba que Titán era la luna más grande de todo nuestro sistema solar.



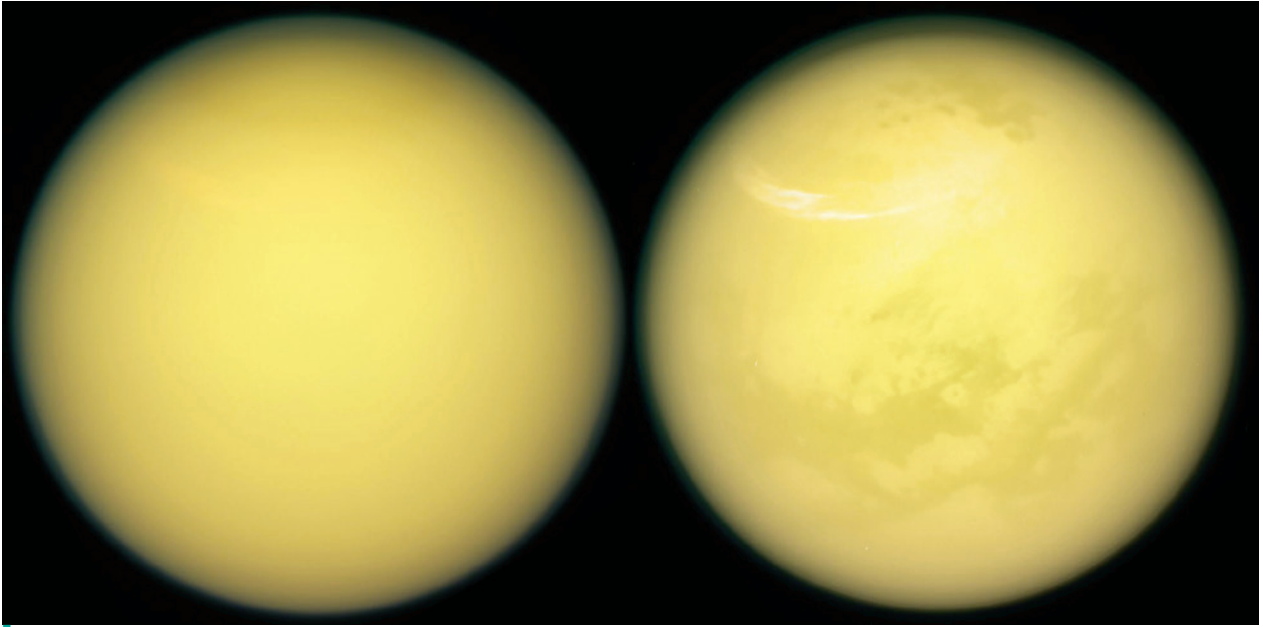


Figura 1. Estas dos imágenes de Titán ayudan a ejemplificar el papel de las misiones espaciales como la Cassini-Huygens, que reveló características de la superficie y de la atmósfera del satélite imposibles de ver en el pasado. Créditos: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute.

Visitando Titán

A pesar de la urgencia por explorar Titán, no fue sino hasta 1979 cuando por primera vez la misión espacial Pioneer 11 observó el satélite y confirmó algunos cálculos que los científicos desde la Tierra habían realizado, como su masa y temperatura; sin embargo, nadie esperaba que Titán fuera, a simple vista, de color naranja.

Las misiones espaciales Voyager 1 y 2 sobrevolaron Titán en 1980 y 1981, respectivamente, confirmando que su atmósfera era densa (1.5 veces más densa que la de nuestro planeta), pero no sólo en gases, sino también en aerosoles (sólidos suspendidos) de color pardo-anaranjado que hacían imposible “ver” la superficie del satélite, con lo cual se demostró que Titán no era la luna más grande de nuestro sistema solar, sino la segunda después de Ganímedes, un satélite natural de Júpiter. Adicionalmente, la misión Voyager 1 determinó la composición atmosférica de Titán, la cual está constituida principalmente por nitrógeno (N_2), metano (CH_4), así como rastros de hidrocarburos (compuestos orgánicos de carbono e hidrógeno) y nitrilos (compuestos orgánicos nitrogenados que contienen el grupo CN). Observaciones adicionales demostraron que en Titán

existe un ciclo comparable al ciclo hidrológico de la Tierra, sólo que de metano; es decir, este compuesto se encuentra en distintas fases: en forma de nubes, lluvia y quizá un océano global. Sin embargo, ni con las observaciones realizadas con el telescopio espacial Hubble en 1994, se pudo confirmar esto. La temperatura en la superficie es de $-180\text{ }^\circ\text{C}$, debido a la inversión térmica, lo cual impide que el agua se encuentre en estado líquido.

La incógnita de la composición de la superficie de Titán se pudo resolver hasta inicios del 2005, cuando la misión espacial Cassini-Huygens arribó al satélite. Ésta constaba de un orbitador (Cassini) y una sonda de descenso (Huygens), que tenía como principal objetivo el descender a la superficie de este satélite y ahogarse en el supuesto océano global. La sorpresa fue grande cuando las primeras imágenes fueron analizadas: Titán tiene una superficie sólida (véase la Figura 2), o al menos una parte de su superficie lo es, como en la Tierra. La misión confirmó también que Titán es único entre las lunas congeladas de Saturno porque tiene una atmósfera densa y compuesta principalmente por nitrógeno, como la de la Tierra, lo que lo convierte en la única luna con una dinámica atmosférica similar a la de nuestro planeta, ya que

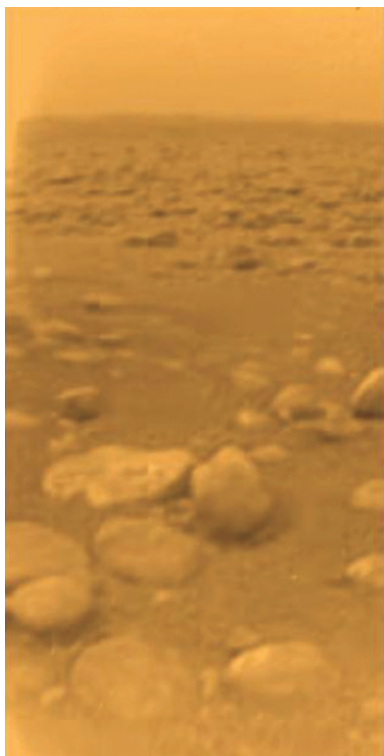


Figura 2. La primera imagen a color de la superficie de Titán. Imagen capturada por la sonda de descenso Huygens. Créditos: NASA/JPL/ESA/University of Arizona.

presenta nubes y tormentas que se conectan con los mares, lagos y ríos de metano, el compuesto orgánico más simple que existe.

¿Podría haber vida en Titán?

La vida es uno de los conceptos más estudiados en la actualidad; se aborda desde distintas perspectivas multidisciplinarias que tratan de comprender qué es y cómo funciona. Sin embargo, no existe un acuerdo que nos ayude a definir dicho concepto. En su lugar, existen cientos de procesos relacionados con la vida que deben estudiarse por separado. Los requerimientos que tiene la vida como la conocemos son tres: presencia de agua líquida, fuentes de energía y bioelementos; sorprendentemente, Titán los tiene. Sin embargo, al parecer en el satélite se trata de procesos previos a la vida, conocidos como prebióticos. Aunque no se descarta la posibilidad de la existencia de vida microbiana extremófila (por ejemplo, metanógenos) que pudiera vivir a temperaturas extremadamente bajas (psicrófilos) como las que tiene el satélite.

Pero, ¿por dónde empezar? Lo mismo nos hemos preguntado los integrantes de la Unidad de Laboratorios Dr. Rafael Navarro-González (ULRN) del Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México, en donde, por más de 25 años nos hemos dedicado a simular en el laboratorio los procesos atmosféricos que ocurren no sólo en Titán, sino en prácticamente todas las atmósferas planetarias de nuestro sistema solar, con la finalidad de tratar de explicar los procesos físicos y químicos que ocurren en ambientes extraterrestres lejanos, para no tener que viajar hasta ellos, o al menos no por ahora.

Preparamos una atmósfera simulada de Titán (10% metano, 90% nitrógeno) por medio de una mezcladora de gases, la introducimos a un reactor de vidrio Pyrex y la sometemos a fuentes de energía que imitan las presentes en el satélite, por ejemplo: la luz ultravioleta con lámparas de deuterio o arco de xenón, los impactos de bólidos por medio de plasmas inducidos por láser o descargas tipo chispas, los rayos cósmicos por medio de fuentes de cobalto (Co^{60}), etcétera (véase la Figura 3).

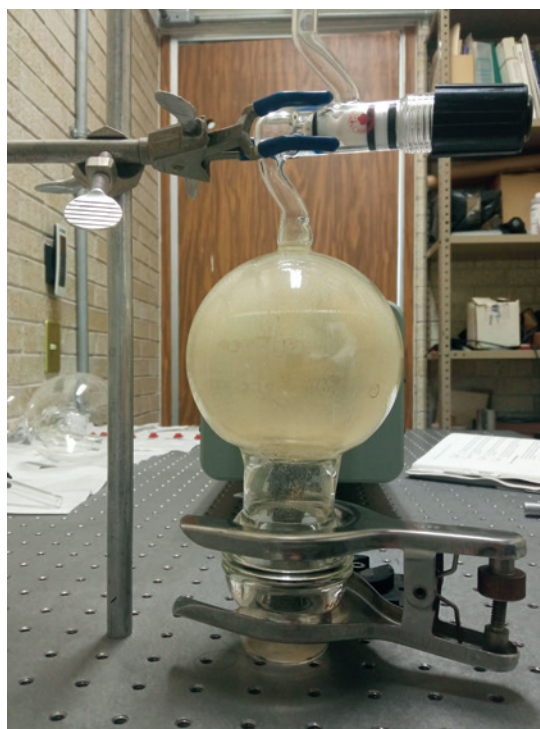


Figura 3. Simulación de la atmósfera de Titán realizada en la Unidad de Laboratorios “Dr. Rafael Navarro-González” del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM (Créditos: Sebastián Mendoza-Téllez).

Los compuestos generados son separados e identificados por medio de las técnicas acopladas (son instrumentos que trabajan en conjunto) de cromatografía de gases y espectrometría de masas, respectivamente; así es como hemos identificado una gran variedad de hidrocarburos y nitrilos, algunos de ellos ya han sido detectados en la atmósfera de Titán y otros posiblemente los detecten las nuevas misiones que se envíen en un futuro próximo. Adicionalmente, en nuestra simulación se generan también compuestos sólidos como los que le dan su característico color naranja al satélite, los cuales llamamos “tolinas” y son análogos a los aerosoles de Titán.

Al igual que la misión Voyager 1 y Cassini-Huygens, en México, integrantes de la ULRN, bajo el mando del doctor Rafael Navarro-González (fallecido), hemos identificado algunos compuestos orgánicos que se piensa jugaron un papel muy fundamental en la síntesis de las primeras moléculas de importancia biológica en la Tierra; como, por ejemplo, el cianuro de hidrógeno (HCN), un compuesto muy tóxico para los humanos, pero con el cual podemos explicar la formación de algunos aminoácidos, puri-

nas y pirimidinas (que son los componentes básicos de las macromoléculas que constituyen la vida), bajo las condiciones ambientales que se piensa tenía la Tierra antes de que la vida pusiera oxígeno (O₂) en su atmósfera.

Gracias a nuestros estudios y a los de otros investigadores internacionales sobre las tolina, en la actualidad se tiene una propuesta para la estructura química de los aerosoles presentes en la atmósfera de Titán, los cuales están formados por compuestos orgánicos aromáticos que adicionan nitrógeno a su estructura. Esto indica que, si estos aerosoles se depositan en la superficie del satélite, es posible que reaccionen y formen compuestos orgánicos mucho más grandes, que quizá sean de interés prebiótico.

Aún falta mucho por visitar...

Es claro que los resultados obtenidos al simular los procesos atmosféricos que ocurren en Titán nos permiten predecir lo que podrían encontrar las futuras misiones que se envíen al satélite. Dragonfly (véase la Figura 4) es una de las misiones espaciales

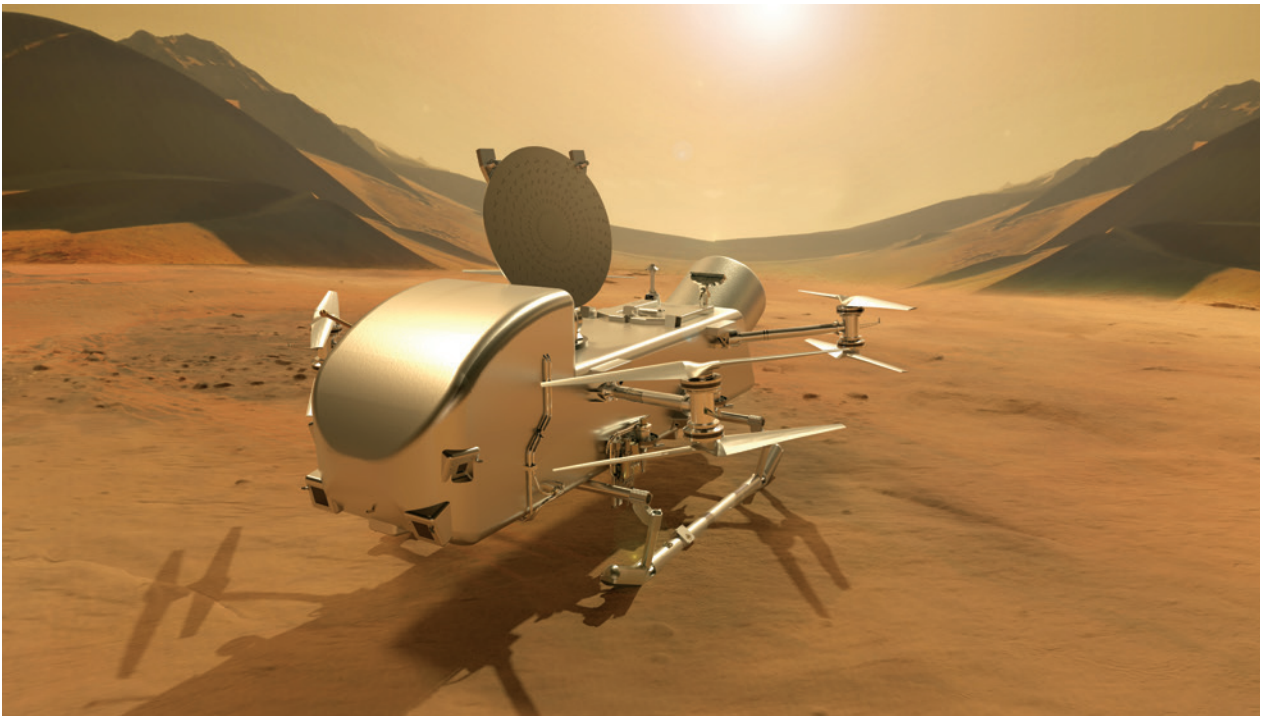


Figura 4. Impresión artística del dron de Dragonfly en la superficie de Titán, la luna más grande de Saturno y un objetivo importante en la búsqueda de signos potenciales de vida más allá de la Tierra. Créditos: NASA/Johns Hopkins apl/Steve Gribben.

de la NASA que se han propuesto para continuar con las investigaciones relacionadas con la química prebiótica y el origen de la vida en el estudio de Titán. Se trata de una misión muy ambiciosa que propone utilizar la atmósfera del satélite para revolucionar la idea del robot explorador que todos tenemos gracias a las misiones espaciales encargadas de explorar Marte (como las del robot Curiosity). A diferencia de un robot explorador con llantas, parecido a un auto, la misión Dragonfly pretende utilizar un dron que volará de un punto de muestreo a otro y analizará tanto la superficie como la atmósfera de Titán. La misión está planeada para enviarse en 2027 y llegará a un lugar conocido como mar de arena de Shangri-La, muy cerca del ecuador de Titán, en el año 2034.

Los objetivos principales de Dragonfly son: estudiar la química prebiótica, el ciclo del metano, la geología, la mezcla de agua con compuestos orgánicos y posibles firmas biológicas del tipo químico. A través de los análisis que puedan realizarse por dicha misión, se podrán confirmar y esclarecer conceptos propuestos por los miembros de la comunidad científica que estudiamos Titán a profundidad. No obstante, para entonces ya habrán pasado al menos 30 años desde la llegada de Cassini-Huygens, evento que deslumbró a la humanidad al descubrirse que Titán no tiene una superficie completamente líquida, y más

de 50 años del vistazo colorido que nos regaló Voyager 1, misión que confirmó que Titán era un mundo de color naranja en donde hay procesos atmosféricos muy parecidos a los que ocurren en nuestro planeta. Pero, ¿qué sorpresa nos espera al continuar la exploración de Titán con la misión Dragonfly?

José Guadalupe de la Rosa Canales

Unidad de Laboratorios Dr. Rafael Navarro González, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM.

delarosa@nucleares.unam.mx

Sebastián Mendoza Téllez

Grupo Interacción Micro y Mesoescala, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM.

sebastian.mendoza@atmosfera.unam.mx

Lecturas recomendadas

Durand Manterola, H. J., E. Martínez Gómez y G. V. Y. Peña Cabrera (2006), "Titán: ¿una incubadora de vida?", *Ciencia*, 57(1):10-13.

Hörst, S. M. (2017), "Titan's atmosphere and climate", *Journal of Geophysical Research Planets*, 122: 432-482. Disponible en: <doi.org/10.1002/2016JE005240>.

Betsaida Lucinda Ávila Suárez y Alejandro Heredia Barbero

De lo simple a lo complejo: la química antes de la vida

La materia está compuesta por átomos que, al unirse, forman moléculas. Las moléculas orgánicas son aquellas formadas por átomos de carbono; algunas han sido detectadas en nebulosas y meteoritos, lo que indica que hay compuestos orgánicos en el universo. Retomando la teoría de la panspermia, aquí analizaremos cómo es que moléculas sencillas formaron agregados más complejos hasta crear la primera célula.

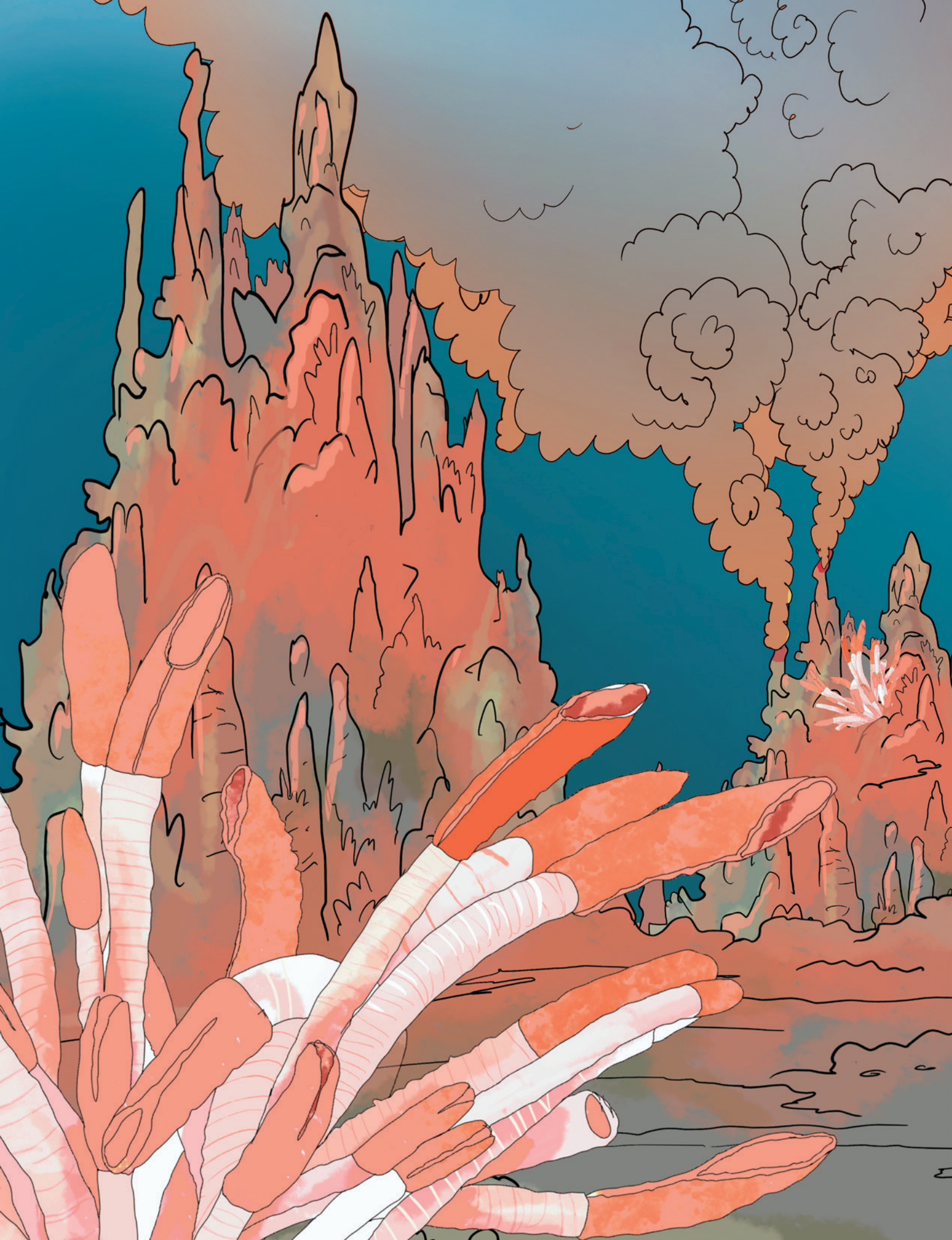
Compuestos orgánicos en el universo

Hace aproximadamente 13.8 mil millones de años se comenzó a formar el universo y algunos de los elementos químicos que conforman nuestro cuerpo. La Tierra y el Sol se formaron poco después de ese suceso que los astrónomos han llamado Big Bang o gran explosión. Otros cuantos se formaron cuando las estrellas comenzaron a chocar entre sí y otros más cuando explotaban algunas estrellas.

Toda la materia está formada por átomos en un movimiento constante al que llamamos *grosso modo* fisicoquímica. Imagina que estos átomos son como piezas de un rompecabezas donde cada una tiene su forma y color, y cuando unes fuertemente varias de ellas (en nuestro caso los átomos), puedes formar algo que la comunidad científica denomina “moléculas” o “compuestos”, que tienen características muy diferentes entre sí.

Algunas moléculas son muy simples, como las del agua, que están formadas por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Otras moléculas son mucho más complejas y existen también moléculas formadas por átomos de carbono; a estas, en especial, las llamamos “moléculas orgánicas”. Este nombre está relacionado con la capacidad de organizarse y formar distintas estructuras “orgánicas”, es decir, con “organización”.

Existen diversas teorías sobre el origen de la vida en la Tierra. Una de ellas se conoce con el nombre de *panspermia*. ¿A quién se le ocurrió esta idea? Desde el siglo V a. n. e., el filósofo griego Anaxágoras ya pensaba que la vida se había dispersado por todo el universo en forma de semillas; muchos siglos después,



a principios del siglo xx, el químico sueco Svante Arrhenius propuso que las esporas bacterianas eran impulsadas por el viento solar de una estrella a otra, en tanto el químico mexicano Alfonso Luis Herrera pensaba que en las condiciones de la Tierra antigua las moléculas complejas y minerales podrían haber formado células.

En años más recientes, la bióloga Lynn Margulis –quien era escéptica respecto a la teoría de la panspermia–, en su libro *¿Qué es la vida?*, realizó la siguiente reflexión: “Si la vida comenzó en el espacio exterior, el estudio de cómo surgió se podría aplicar a cualquier otro planeta distinto de la Tierra. De hecho, la Tierra misma está suspendida en el vacío, así que, se mire como se mire, la vida se originó en el espacio”, refiriéndose, claro, a que el planeta Tierra sigue siendo parte del sistema solar y del universo.

Ahora sabemos que esos compuestos orgánicos del universo deben de haber sido los primeros en combinarse con el material inorgánico presente en nuestro planeta para sintetizar o formar las primeras moléculas complejas. Los compuestos inorgánicos a los que nos referimos son las rocas, las fases minerales que las componen y los muchos iones disueltos en los océanos y charcas en la Tierra primitiva. Volviendo a las moléculas orgánicas, éstas fueron inicialmente muy simples y pequeñas, con un nivel de complejidad que pudo aumentar progresivamente hasta formar las más grandes y complejas, ya en la dirección de los seres vivos.

¿Por qué mencionamos “en la dirección de los seres vivos”? Porque hay un conjunto de moléculas orgánicas que se fueron en otra “dirección” en la evolución molecular y que son los nanotubos de carbono, los fullerenos, el grafeno y el grafito, también presentes en el medio interestelar pero que no son, aparentemente, relevantes para los procesos biológicos y tampoco son producto de éstos. De hecho, algunos de ellos son venenosos.

Entonces, ¿cómo es que se originaron moléculas más complejas a partir de moléculas pequeñas? No lo sabemos con exactitud, pero quizá esos compuestos grandes y funcionales, al interactuar con las rocas, fueron los primeros *catalizadores*, palabra que se utiliza en química para decir que esas mismas moléculas

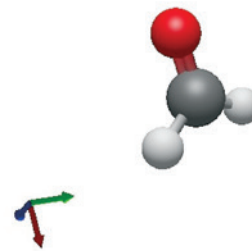


Figura 1. Molécula de formaldehído (CH₂O). Realizado en Avogadro 1.97.0.

ayudaron a que algo –una reacción– sucediera más rápido o de una manera más sencilla. Aquí analizamos estas posibilidades.

En el universo, las moléculas orgánicas existen en casi todos los medios: en las nubes interestelares, cometas, asteroides y en los meteoritos: rocas que tenemos al alcance para su estudio, ya que han logrado atravesar la atmósfera de nuestro planeta y aterrizar en la superficie terrestre. Por ejemplo, en 1969 se detectó la molécula de formaldehído (Figura 1) en la nebulosa de Orión, lo que nos sugiere que los compuestos orgánicos similares a esta molécula simple, debieron también estar presentes cuando recién se formó la Tierra.

Meteoritos: el nuevo escenario para el origen de la vida en la Tierra

Un meteorito es una roca –de más de 10 micras y que puede llegar a medir metros– procedente de un cuerpo celeste que puede ser un cometa, asteroide o meteoride (Rubin y Grossman, 2010). Los meteoritos se forman en el espacio exterior, sobreviven a la atmósfera y llegan a la superficie de algún planeta o de la Luna, por ejemplo. Como han sido estudiados por muchos científicos, los han clasificado con diversos nombres basándose en su composición química y en los minerales que contienen, entre otras cosas.

El tipo de meteoritos del que nos ocuparemos aquí son los llamados *carbonáceos*, los que, como su nombre lo indica, contienen carbono, por lo que de cierta manera en ellos tenemos una muestra de la química orgánica extraterrestre. Los meteoritos carbonáceos que han sido muy analizados son el de Murchison y

el de Allende (este último, por cierto, cayó al sur del estado de Chihuahua). Pero, ¿cómo le hicieron estos compuestos orgánicos para aparecer también en la Tierra primitiva hace miles de millones de años? Los clásicos experimentos de un bioquímico estadounidense llamado Stanley Miller lo explican mostrando que se podía obtener un alto rendimiento; por ejemplo, de algunos aminoácidos cuando una mezcla de gases —como hidrógeno, metano, amoníaco y vapor de agua— eran expuestos a una descarga eléctrica. Los aminoácidos son los pequeños bloques de construcción para formar las proteínas, que son biomoléculas ya distintivas y muy importantes para la vida.

Esta demostración de que material orgánico complejo como el de los aminoácidos pudiera sintetizarse tan fácilmente en condiciones prebióticas, en el laboratorio, fue reafirmada cuando se descubrió que en los meteoritos carbonáceos también había aminoácidos, hidrocarburos y muy poca cantidad de otras moléculas, como las purinas, que son componentes básicos de los ácidos nucleicos —otras biomoléculas importantísimas que componen al material genético—. Por ello, ya era claro que si en el laboratorio podían formarse compuestos orgánicos complejos, era posible que se formaran en cualquier lugar del universo. En otras palabras, si en los meteoritos ocurre todo esto, es razonable suponer que pudieron haber ocurrido reacciones químicas similares en la superficie de nuestro planeta antes de haber vida, las cuales dieron como resultado la formación de complejos compuestos químicos ya muy parecidos a los que están en nuestras maquinarias biológicas.


A las piezas fundamentales que forman las cadenas de las moléculas muy complejas (el material genético y proteínas) se les llama *monómeros*. También en los plásticos existen estas cadenas y, de forma similar, si se cortan, hallamos monómeros. Dicho sea de paso, también hay moléculas parecidas a los plásticos afuera de nuestro planeta y aparentemente no son contaminación, sino compuestos parecidos a los monómeros de los plásticos que contaminan nuestro planeta, pero sintetizados en el espacio.

Con los monómeros orgánicos disponibles en concentraciones razonables, se pudieron haber generado esas moléculas muy complejas de la vida, for-

mando lo que ahora se conoce como sistemas autoensamblados (un ejemplo de autoensamblamiento se da en los aceites que vemos tirados en las calles, que generan un patrón de colores justamente porque las moléculas de ese aceite están arregladas en el espacio), y en algún momento dichas moléculas al ensamblarse a niveles mayores, como el de una membrana, adquirieron algunas características mínimas del estado vivo. El estado vivo se caracteriza por existir como una entidad delimitada por una membrana, crear una célula, utilizar energía, crecer mediante procesos de polimerización y con la capacidad de dividirse para producir otra generación y adaptarse al ambiente.

Los procesos de autoensamblamiento favorecidos por procesos de deshidratación pudieron ser relevantes en la Tierra primitiva, ya que algunos autores sugieren que dichos procesos, así como las oligomerizaciones —es decir, el agrupamiento con mucha fuerza de varias moléculas más pequeñas—, están presentes en algunos meteoritos. Si estos compuestos están presentes en meteoritos, se esperaría que estuvieran en la Tierra primitiva. En los meteoritos estos compuestos tienen masas moleculares relativamente grandes, lo que abre la posibilidad de múltiples reacciones complejas como las que generaron la vida en la Tierra.

Procesos de autoensamblaje/autoorganización

 Como ya vimos, en nuestra Tierra primitiva no había moléculas tan grandes como las proteínas o los ácidos nucleicos para que se dirigieran los procesos de ensamblaje característicos de la vida. Las primeras formas de vida surgieron a partir de estos compuestos ya grandes, por lo que es importante saber que hay otras moléculas orgánicas capaces de autoensamblarse u organizarse en estructuras microscópicas y hasta macroscópicas: estas moléculas reciben el nombre de moléculas *anfifílicas* o *anfipáticas* (términos que quieren decir que les gusta el agua en un lado y en otro lado les gustan los aceites; tales propiedades se usan, por ejemplo, en los jabones). Pero, ¿cómo se formaron? Existen diversas teorías: una es la de Darwin, quien consideró como primeros

reactores moleculares los “pocitos calientes” –del inglés: “*warm little ponds*” (Mulkiđjanian *et al.*, 2012)–, en donde había agua, rocas y trozos de minerales que actuaron como catalizadores, originándose reacciones que dieron paso a la formación de ácidos grasos y fosfolípidos que a la postre formaron vesículas (una forma de decir “micela” o “pelotita”) lipídicas que se conocen como moléculas anfífilas, como mencionamos antes.

Cuando surgen estas vesículas lipídicas, alcoholes de cadena larga o fosfolípidos, surge lo que ahora conocemos como premetabolismo (término que refiere a la síntesis de los compuestos que forman estas vesículas y que tienen un contenido parecido a la vesícula de la que provienen) y se originan así las moléculas autorreplicantes (que se forman a sí mismas con moléculas más simples). Todo esto debió darse en un medio acuoso rico en los fosfolípidos asociados a los minerales y rocas. Estos procesos de autoensamblamiento relativamente sencillos dieron el espacio restringido que necesitaba nuestro primer grupo de células: la micela (Figura 2).

Una vez que los fosfolípidos primitivos se sintetizaron, a la postre se ensamblaron y sugerimos que en la parte interna ya tenían las moléculas suficientes y necesarias para la creación de la primera célula. Las estructuras moleculares mínimas se acoplaron a las reacciones de las superficies minerales –ya reducidos también en tamaño y atrapados en las micelas–, dando origen a esta nueva termodinámica que es lo más complejo que ha visto el universo: la vida. Por la presencia de fosfatos, seguramente el medio

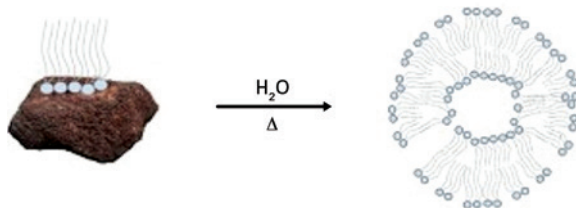


Figura 2. Autoensamblamiento de moléculas lipídicas en superficies minerales. Las moléculas lipídicas, liberadas por los meteoritos de tipo carbonáceo, o sintetizadas en la Tierra, se acumularon en las superficies de los minerales que se encuentran en las rocas (izquierda). La reacción en fase acuosa pudo ser capaz de originar el ordenamiento esférico de la micela. Al ser su configuración más estable, la de una esfera (derecha), se formarían las primeras comunidades de micelas para dar paso en algún momento a procesos celulares.

en que se desarrolló esta comunidad de células debió de contener en abundancia estos compuestos ricos en fósforo, como es el caso de la apatita, la cual es un cristal que también representa otra forma de autoorganización (Figura 3).

Durante la formación de una micela y un cristal se lleva a cabo un proceso autocatalítico relativamente simple, porque la misma reacción de crecimiento de la pelotita (la micela) y el crecimiento del cristal aceleran su autoorganización (Luisi, 2010). Un ejemplo más es el del autoensamblamiento del ADN o ácido desoxirribonucleico (Figura 4). En los tres casos hay niveles de organización molecular: formación de la micela, nucleación del cristal (así se le llama a la formación inicial de un cristal) y el ADN; esto es, partimos de componentes simples como azúcares, fosfatos, todos más o menos desordenados en el espacio, con bajos pesos moleculares. Poco a poco se van acomodando y organizando por ellos mismos; es decir, autoorganizando.

Conclusiones

En estas páginas hemos querido dar a conocer que el ambiente fisicoquímico en la Tierra primitiva fue suficiente para dar origen a la vida. Muchos otros factores deben valorarse para dar fundamento a esta fisicoquímica compleja basada en el autoensamblamiento de moléculas orgánicas, iones y partes de



Figura 3. La apatita es un mineral que contiene en su estructura química fosfatos y calcio, por lo que puede explicar incipientemente el medio en el que se desarrollaron las primeras células.

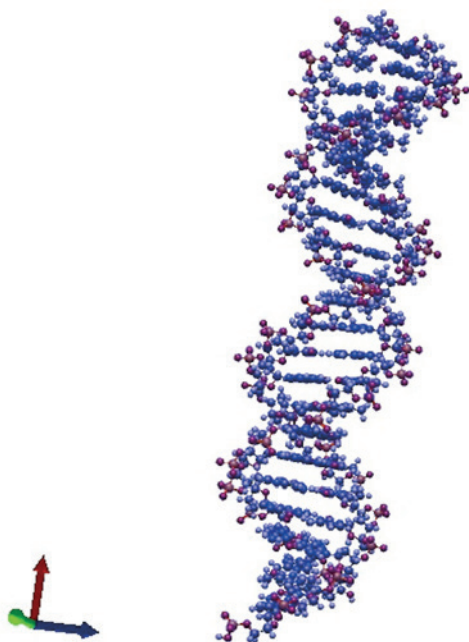


Figura 4. Cadena de ADN (ácido desoxirribonucleico), el cual contiene los genes que mediante distintos procesos producen proteínas. Realizado en Avogadro 1.97.0.

cristales que convirtieron compuestos orgánicos relativamente estables y simples en una orquesta de adaptación al medio, de obtención de la información local y con capacidad de heredarla. Gran parte de la historia de la Tierra primitiva se condensa en los seres vivos, donde los compuestos orgánicos e inorgánicos coexisten en un diálogo permanente en que se dan o se quitan mutuamente la estabilidad termodinámica. En nuestro grupo de trabajo hemos conseguido hacer simulaciones computacionales a distintos niveles y valoramos esta dialéctica a nivel de átomos y moléculas con otras técnicas que miden la estabilidad de estas estructuras. Uno de estos experimentos que nos gusta hacer es el de crecimiento de moléculas como los aminoácidos con reacciones en las que se extrae el agua para simular un charco que se hidrata y deshidrata, como pudo pasar en el planeta Tierra ancestral.

Se simulan estas condiciones por muchos factores, por ejemplo, porque en el momento de la creación de la Luna por el impacto de un cuerpo inmenso con la Tierra, los días eran más rápidos y por tanto el efecto de las mareas era más claro; esto es porque la Luna estaba más cerca de la Tierra y nos afecta-

ba más, causando procesos de marea más frecuentes que los actuales, y por tanto los procesos de hidratación-deshidratación participaban con más relevancia. Lo que queremos decir es que seguramente en ese tiempo el año terrestre tenía cientos de días más, con cambios de mareas muy seguidos. En ese tiempo, además, pasaron otras cosas muy importantes en nuestro planeta: la formación del campo magnético y tal vez la aparición del primer supercontinente, denominado Vaalbará.

Como vemos, esta revolución fisicoquímica que dio origen a la vida a partir de moléculas relativamente simples es una condición adicional en la evolución molecular en el universo y pasó en el momento en que sucedían muchas cosas en la Tierra primitiva. Entender la formación de la vida a partir de los compuestos más simples es uno de los trabajos que se desarrollan en nuestro Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México. Daremos seguimiento a estos avances y esperamos poder darles noticias novedosas y atractivas que nos expliquen un poco más en este sentido.

Betsaida Lucinda Ávila Suárez

Laboratorio de Evolución Química, Departamento de Química de Radiaciones y Radioquímica, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM. avilabethlu@gmail.com

Alejandro Heredia Barbero

Laboratorio de Evolución Química, Departamento de Química de Radiaciones y Radioquímica, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM. aheredia@correo.nucleares.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Luisi, P. L. (2010), *La vida emergente: De los orígenes básicos a la biología sintética*, México, Tusquets.
- Mulkidjanian, A., A. Bychkov, D. Dibrova, M. Galperin y E. Koonin (2012), "PNAS Plus: Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(14):E821-E830.
- Rubin, A. E. y J. N. Grossman (2010), "Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions", *Meteoritics & Planetary Science*, 45(1):114-122.

Lilia Montoya y Elva Escobar-Briones

Los océanos del sistema solar

El punto azul pálido que presenta la Tierra a la distancia resulta del hecho de que está cubierta por agua en casi un 71% de su superficie. Si bien inmenso, este océano es menor si se lo compara con los de Encélado (satélite de Saturno) y Europa (satélite de Júpiter). Estos océanos han sido evidenciados, por ejemplo, gracias a la misión espacial Cassini que, al sobrevolar a Encélado, encontró chorros de agua que emanan de su hemisferio sur. Por tanto, la oceanografía ya no se restringe a la Tierra porque existen exo-océanos y éstos podrían ocurrir también en otros cuerpos del sistema solar exterior.

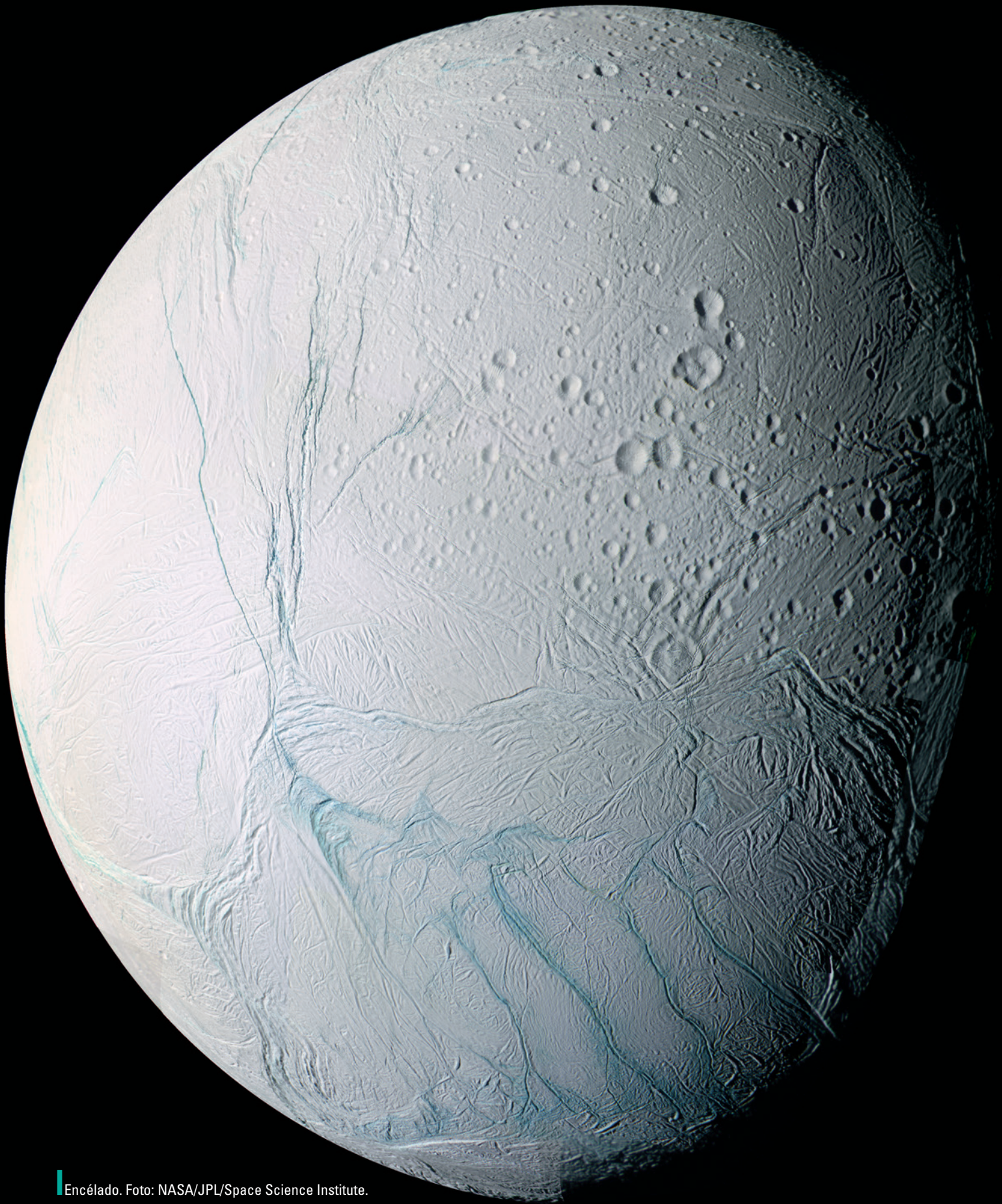
Introducción

El debate acerca de la vida en el sistema solar inició en Marte, un planeta terrestre cuyas estructuras fueron interpretadas como canales por Giovanni Schiaparelli en 1877. Seguidamente, en el imaginario científico y literario estaba implícita la imagen de “la vida extraterrestre” al pensar en Marte. Transcurrieron aproximadamente cien años para que los satélites de hielo del sistema solar exterior irrumpieran en el debate.

Marte y la Tierra, al igual que Venus y Mercurio, se agrupan como planetas terrestres por guardar similitudes en cuanto a tamaño, geología y composición química. Las similitudes han explicado y justificado que desde un inicio se haya supuesto y buscado vida en Marte. Irónicamente, es más allá de Marte, en algunos satélites de hielo de Júpiter, Saturno y probablemente Urano, en donde se ha encontrado la triada de la vida para la astrobiología: moléculas orgánicas, agua líquida y fuente de energía.

Coincidencia afortunada

Durante la década de los 70 se produjeron avances científicos en áreas tan distantes que sólo la ciencia ficción encabezaría la inusual combinación de lo que a la



Encélado. Foto: NASA/JPL/Space Science Institute.

Cuadro 1. Antecedentes históricos o de trasfondo que forjaron la idea de la astrobiología de los exo-océanos

1979	John B. Corliss y cols. confirman la circulación convectiva de agua marina en las crestas oceánicas: las ventilas hidrotermales, un ecosistema reconocido por geofísicos marinos del Instituto Scripps de Oceanografía de California, en 1973.
1979	Imágenes obtenidas durante los sobrevuelos de las naves espaciales Voyager 1 y 2 sobre el sistema joviano descubren que la superficie helada de Europa está accidentada, lo que sugiere que el interior podría estar térmicamente activo.
1977	Carl Woese reestructura la clasificación de los seres vivos en tres dominios, estableciendo el uso del gen ribosomal 16S rRNA como fuente informativa para comparar a todos los seres vivos.
1975	El físico planetario Guy J. Consolmagno publica una tesis enfocada en la energía térmica de los satélites de hielo que propone un océano en estado líquido al interior de Europa.
1974-1975	Gordon de Quetteville Robin y cols. reconocen por ecosondeo lagos subglaciales en la Antártida, sugeridos desde 1968, entre los que destaca el Lago Vostok como el mayor y más profundo de todos.
1974	Robert D. MacElroy propone el término extremófilo, que significa “amantes de lo extremo,” y utiliza como organismos de referencia a los termófilos y halófilos, los cuales crecen preferentemente en condiciones de temperatura y salinidad altas.


postre se convertiría en la astrobiología del sistema solar exterior. En el cuadro 1 se presenta un recuento de los hitos más importantes que incentivaron la astrobiología de los satélites de hielo.

Sin duda, la ciencia se sirve de la imaginación y viceversa. Un claro ejemplo de esto es Europa, uno de los satélites de Júpiter. En 1980 el autor Richard G. Hoagland publica una nota titulada “The Europa enigma” y propone que podría haber vida en un océano con ambientes hidrotermales de dicho satélite. Hoagland llamó la atención hacia Europa de Arthur C. Clark, quien situaría ahí sucesos significativos de su novela 2010: *El año que hicimos contacto*. Sin embargo, abrirse a la creatividad tiene límites y un costo, como resulta evidente en los escritos de Hoagland, autor prolífico para lectores ávidos de teorías, que la comunidad científica califica como pseudociencia.

Una propuesta con sustento cuantitativo sobre la habitabilidad de Europa fue la de Reynolds y cols., publicada en 1983. En ésta encontramos la primera formulación de lo que actualmente se conoce en astrobiología como “Follow the water” (“seguir el agua”), la cual propone como directriz que el hallazgo de agua líquida en un objeto celeste es un primer filtro para que un sitio sea considerado habitable. Este artículo significó también que en la astrobiología, otrora exobiología, se contaba con conceptos, métodos y tecnologías suficientes para resolver hipótesis más lejanas, incluyendo el uso de uno de los términos más comunes de la jerga astrobiológica:

habitabilidad. Cabe mencionar que los autores dan crédito a Hoagland en sus referencias, además de a Arthur C. Clark.

 **Los exo-océanos**

 ¿Cómo permanece líquida el agua para formar océanos? El calor que funde el hielo proviene de un proceso conocido como mareas gravitacionales. Algunos de los satélites del sistema solar exterior retuvieron agua desde su agregación original y ésta permanecería en estado sólido de no ser por las deformaciones periódicas causadas por la atracción hacia su planeta. Las mareas provocan una fricción del material interior que se disipa en forma de calor y puede incluso fundir el hielo. Y no sólo los gigantes gaseosos exteriores contribuyen al calentamiento por mareas, algunos satélites cercanos son masivos también (por ejemplo, Titán y Ganímedes), de manera que, aunque el campo gravitacional podría estabilizarse adquiriendo una órbita circular (es decir, con una excentricidad de cero) y disminuir el efecto de marea, la atracción gravitacional ejercida por otros satélites determina órbitas excéntricas o elípticas. En satélites como Europa en el sistema joviano, o Encélado, una luna de Saturno, el efecto del campo gravitacional ejercido por los satélites masivos determina que ocurra entre ellos resonancia orbital, es decir, sus periodos de traslación guardan una proporción geométrica o en armónicos; por ejemplo, los satélites

mayores de Júpiter: Ío, Europa, Ganímedes, conocidos como galileanos por su descubridor, Galileo, quien también reportó que presentan una resonancia entre sí de 4:2:1 (Figura 1).

De esta manera, las misiones espaciales enfocadas al sistema solar exterior contenían instrumentos para ayudar a discernir la existencia de agua líquida en los satélites mayores; por ejemplo, los satélites galileanos en Júpiter, Titán o Encélado en Saturno y Tritón en Urano. Podría decirse que, en cuanto a las ciencias oceánicas del sistema solar exterior, dos misiones tributaron lo que para la Tierra constituyeron hace 150 años las campañas oceanográficas Challenger (1872-1876). Nos referimos a la misión Galileo (1995-2003) de la NASA y la Cassini-Huygens (2004-2017) de la NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA) (Figura 2).

Galileo fue la primera misión que partía al sistema solar con la suposición de la existencia de océanos, de manera que buscó explorar a los satélites galileanos con muy diferentes instrumentos. Al parecer la prueba más concluyente de la presencia de un océano en Europa es su campo magnético. La explicación de este campo se reduciría a que existan sales disueltas en el agua. El agua salada es un material conductor inducido por Júpiter.

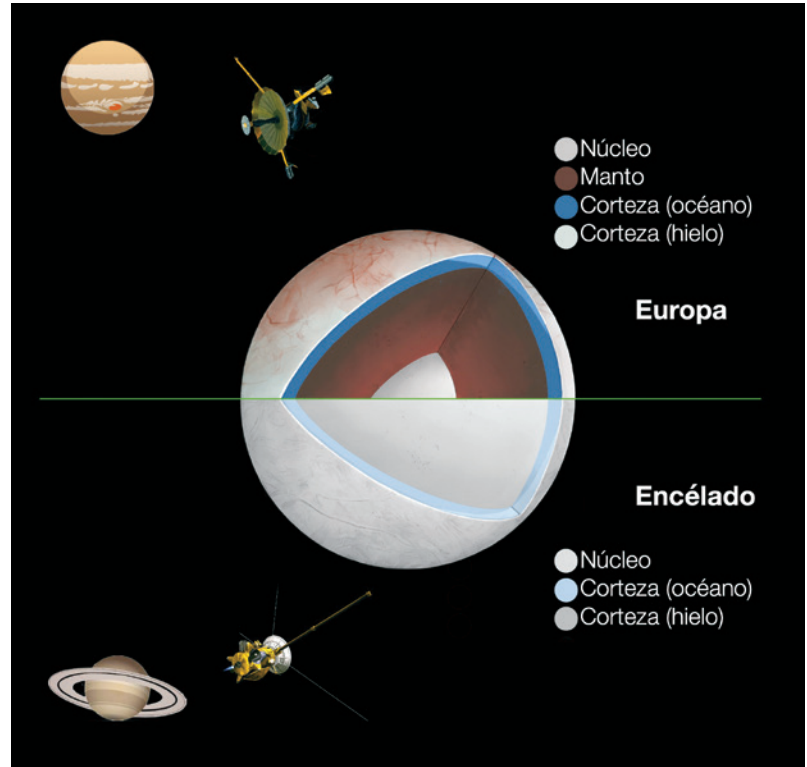


Figura 1. Estructura interna de Europa (panel superior) y Encélado (panel inferior), con las misiones espaciales que más han aportado a su entendimiento: Galileo y Cassini. Imagen: Lilia Montoya y Citlame F. Franco Rodríguez.

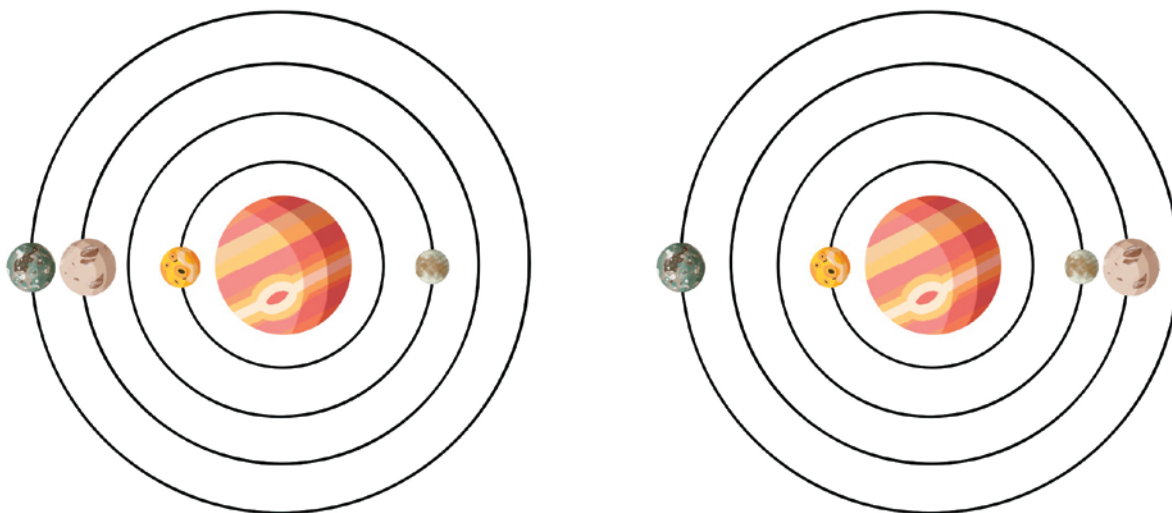


Figura 2. Sistema joviano con los satélites mayores. Del interior al exterior: Júpiter, Ío, Europa, Ganímedes, Calisto. Cada vez que Ganímedes hace una órbita alrededor de Júpiter, Europa e Ío hacen dos y cuatro, respectivamente. Esta “resonancia” se produce en la proporción 1:2:4. Europa es atraída por campos gravitacionales cambiantes, por ejemplo, el campo acumulado de Júpiter y los otros tres satélites galileanos (panel de la izquierda); otro escenario es una distorsión gravitacional por ambos flancos (panel de la derecha). Imagen: Lilia Montoya y Citlame F. Franco Rodríguez.

Una aportación más de la misión Galileo fue el discernir la composición química del océano; es decir, además de agua, ¿cuáles sales podríamos encontrar? Esta información es de suma importancia para la habitabilidad, pues se sabe que los seres vivos toleran condiciones físicas y fisicoquímicas definidas. De manera que en estos océanos no necesariamente encontraremos cloruro de sodio como ocurre en nuestro planeta.

La misión Cassini-Huygens, con sólo sobrevolar Encélado, nos ofreció una vista lo suficientemente motivadora para desear volver con una instrumentación más sofisticada. Durante su primera visita a Encélado se apreciaron chorros de agua que emanaban del polo sur –antes mencionados–. Además, la instrumentación de Cassini indicó la presencia de metano y partículas nanométricas de sílice. El conjunto de estos hallazgos sustenta la hipótesis de que este satélite de Saturno contiene un océano y actividad hidrotermal en su interior.

 **Ambientes análogos en México a los de los exo-océanos**

La Tierra es la referencia de un mundo oceánico. Éste ha sido el océano mejor estudiado en el sistema solar y valida la definición de la Hoja de Ruta para Mundos Oceánicos del grupo de evaluación de Planetas Exteriores de la NASA que describe un “mundo oceánico” un cuerpo que cuenta actualmente con un océano en estado líquido. Algunos de estos cuerpos perdieron o siguen perdiendo el agua. Otro término que refiere a algunos de estos cuerpos es “lunas de hielo”. Una fuente de energía es un requerimiento fundamental para mantener líquido el océano, especialmente a gran distancia del Sol; con ello, se proporcionan condiciones para la evolución y desarrollo de vida. Dicha fuente de energía puede ser externa (la presencia de un satélite o planeta con energía gravitacional y mareomotriz) e interna (geológica y geoquímica).

En la búsqueda de vida en mundos oceánicos contemporáneos y con océanos pasados en el sistema solar, existen diversos criterios. Debido a que la exploración espacial aún no ha confirmado la pre-

sencia de exo-océanos, uno de los criterios es reconocer análogos o ejemplos equiparables en los cuerpos de agua de la Tierra que podrían ejemplificar a los exo-océanos en el sistema solar. Los análogos son ambientalmente extremos para la vida actual, no así para la vida pasada. La diversidad geológica y ambiental en el océano actual y en cuerpos de agua en el planeta Tierra se ejemplifican vastamente conforme se lleva a cabo la exploración. A continuación, se citan algunos sistemas análogos de valor y utilidad para el estudio de los exo-océanos:

1. Las salmueras ricas en cloruro de magnesio ($MgCl_2$), de interés en futuras misiones por su capacidad de preservar biomarcadores genéticos.
2. El mar profundo con y sin actividad hidrotermal, bajo hielo, de fondos con arcillas, elevada concentración de materia orgánica y con condiciones hipóxicas y anóxicas.
3. Lagos submarinos de salmuera, infiltraciones de metano y volcanes de asfalto.

La comunidad científica nacional e internacional ha estudiado en México sitios con condiciones equiparables y criterios que caracterizarían a los exo-océanos:

1. Cuerpos de agua epicontinentales:
 - pozas caracterizadas por sulfato de calcio o yeso en Cuatro Ciénegas, Coahuila;
 - lagos ricos en salmueras de $MgCl_2$ en Rincón de Parangueo, Guanajuato, y Hundido, Coahuila;
 - cenotes profundos en el Sistema Zacatón, Tamaulipas;
 - lagos formados durante la explosión de volcanes denominados como “maar”; un ejemplo es el lago Alchichica, en Puebla, característicamente salino, alcalino sódico, con hipoxia y anoxia temporal y con concentraciones importantes de magnesio;
 - lago con sulfato de sodio (tequesquite), carbonato de calcio y cloruro de sodio en Texcoco, Estado de México;
 - lagos con elevada radiación uv en el Nevado de Toluca, Estado de México;

- aguas con ácido sulfúrico (H₂S) en el lago Chichonal, Chiapas, y la Cueva Villa Luz, Tabasco;
 - cuerpos de agua costeros hipersalinos, ricos en MgCl₂, en Guerrero Negro, Baja California; y laguna Mar Muerto, Oaxaca.
2. Ventiladas hidrotermales o sistemas de convección de agua con elevada temperatura y compuestos minerales en algunas localidades del fondo marino. En México se han descrito en el Golfo de California; y en el Pacífico Oriental Tropical:
 - ventilas en aguas poco profundas o someras de Punta Banda y Bahía Concepción, Baja California; y en Punta Mita, Nayarit, con elevadas concentraciones de dióxido de carbono (CO₂), nitrógeno (N₂), metano (CH₄) y ácido sulfúrico (H₂S);
 - ventilas profundas de las cuencas Alfonso, Pescadero, Guaymas, 21° N en la Dorsal del Pacífico Oriental y el Archipiélago Revillagigedo.
 3. Infiltraciones de metano y chapopoterías profundas:
 - infiltraciones del Margen de Sonora, Golfo de California;
 - diapiros o domos de sal que ascienden a través de fracturas en el fondo marino y chapopoterías en el talud continental o zona batial de la Sonda de Campeche.
 4. Sedimento y agua profundos, así como zona hadal (zona más profunda del océano, a más de 6 500 metros):
 - zona de oxígeno mínimo del Pacífico Oriental Tropical;
 - Trinchera Mesoamericana.

La exploración espacial

La exploración de los exo-océanos está garantizada para una o dos décadas más con las misiones JUICE (del inglés JUPITER ICy moons Explorer) –desarrollada por la Agencia Espacial Europea y que fue lanzada en abril del 2023– y Europa Clipper y Hera, de la NASA, proyectada para lanzarse en octubre 2024, misiones que han coincidido con la Década de los Océanos (2021-2030) para el Desarrollo Sostenible, declarada por la ONU. Esta exploración necesitará



referentes experimentales y ambientales, como es el caso de nuevas formas de identificar planetas habitables y planetas potencialmente habitados, comparando la cantidad de dióxido de carbono en sus atmósferas, pues los valores bajos sugieren que hubo agua líquida que se disolvió o fue secuestrada en el océano, en el sedimento o en la biomasa.

Lilia Montoya

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
lilia.montoya@ciencias.unam.mx

Elva Escobar Briones

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
escobri@cmarl.unam.mx

Lecturas recomendadas

- German, C. R. *et al.* (2021), “Ocean system science to inform the exploration of ocean worlds”, *Oceanography*, 35(1):16-22.
- Hendrix, A. R. *et al.* (2019), “The NASA Roadmap to Ocean Worlds”, *Astrobiology*, 19(1):1-27.
- Howell, S. M., W. C. Stone y K. Craft (2020), “Ocean worlds exploration and the search for life”. Disponible en: <doi.org/10.48550/arXiv.2006.15803>.
- Joseph, A. (2023), *Water Worlds in the Solar System*, Países Bajos, Elsevier.
- Martin, A. y A. McMinn (2018), “Sea ice, extremophiles and life on extra-terrestrial ocean worlds”, *International Journal of Astrobiology*, 17(1):1-16.
- Montoya, L., G. Cordero y S. Ramírez (2022), *Astrobiología: una visión transdisciplinaria de la vida en el universo*, México, FCE/UNAM/ICN.

Sandra Ignacia Ramírez Jiménez



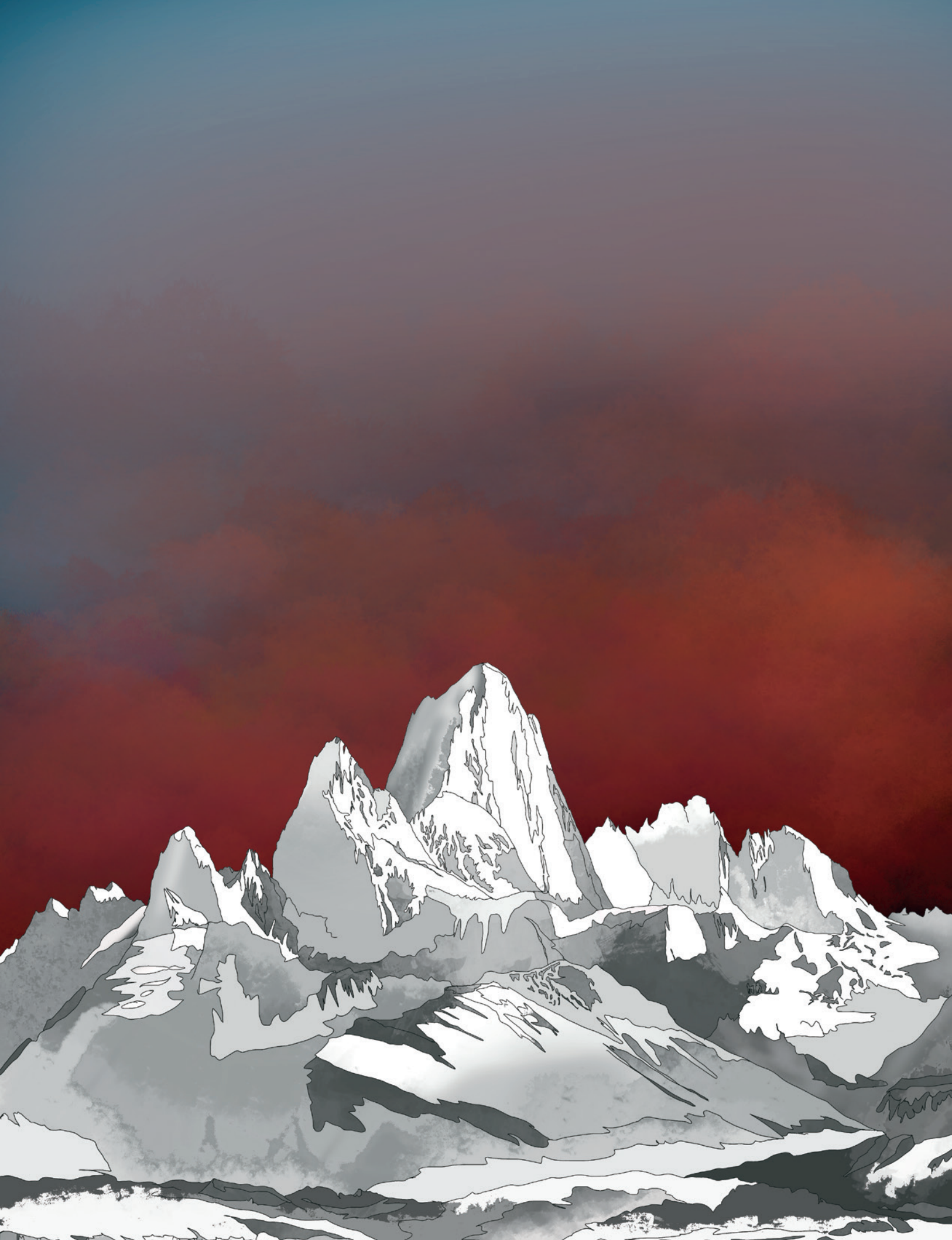
La vida al extremo en la superficie de Marte

¿Qué pasaría si una bacteria que requiere ambientes altamente salinos para vivir se pone en contacto con lodos enriquecidos en sales de cloratos y percloratos como los de la actual superficie de Marte? En el Laboratorio de Simulación de Ambientes Planetarios del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (CIQ-UAEM) investigamos preguntas como ésta en el marco de la astrobiología.

La astrobiología

La astrobiología es un área de estudio multidisciplinaria ya que para el cumplimiento de sus objetivos incluye conocimientos de diferentes áreas, como la astronomía especializada en el estudio de la génesis y evolución de galaxias y de sistemas planetarios; la biología que se ocupa de la distribución y evolución de los seres vivos; la geología que investiga las características propias de un planeta y la posibilidad de la existencia de ambientes habitables en éstos; la química que estudia cómo pudieron haberse sintetizado las primeras biomoléculas importantes para los seres vivos en las condiciones de la Tierra primitiva, entre otras.

Las personas dedicadas a la astrobiología han identificado tres requisitos indispensables para todos los seres vivos terrestres: agua líquida, elementos químicos útiles para la síntesis de biomoléculas (como azúcares o proteínas) y una fuente de energía utilizable para las funciones básicas de los seres vivos (como crecer o reproducirse, por mencionar algunas). Si en algún planeta o satélite se cumple alguno de estos requisitos, se convierte entonces en un objeto de interés astrobiológico en el que se evalúa la posibilidad de albergar alguna forma de vida terrestre, ya que hasta el momento es el único ejemplo de vida que se conoce. En este sentido, las evidencias que indican que probablemente existen salmueras de percloratos y cloratos sobre la actual superficie del planeta Marte y las que apuntan hacia un antiguo Marte sobre el que corría agua líquida, lo sitúan como uno de los planetas del sistema solar de más interés para la astrobiología.



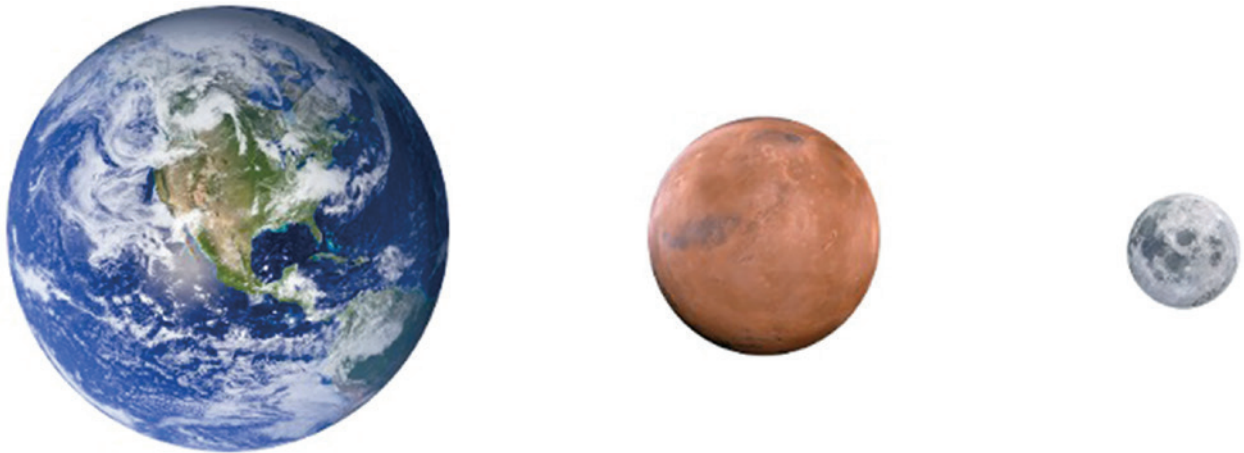


Figura 1. El planeta Marte (centro) comparado con la Tierra (izquierda) y la Luna (derecha). El tamaño de los objetos está a escala.

El agua en Marte

Marte fue un planeta geológicamente activo que tuvo agua líquida sobre su superficie, según lo indica el descubrimiento de evidencias de erosión fluvial, las observaciones de gigantescos valles y cañones, así como de lechos de ríos, ahora secos. La presencia de minerales hidratados, como olivino y sulfatos de calcio y magnesio, en rocas ígneas analizadas robóticamente en la superficie del Marte actual, sólo puede explicarse como una consecuencia de eventos hidrotermales, indicativos de la existencia de agua líquida en algún momento de la historia del planeta rojo. En la Figura 1 se compara el tamaño de Marte con el de la Tierra y de la Luna.

La información espectral en la región del infrarrojo colectada por el Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) a bordo del orbitador Mars Reconnaissance (MRO) indica la presencia de sales hidratadas en laderas que presentan cambios y movimientos estacionales, mejor conocidas como *recurring slope lineae*. La hidratación observada puede deberse a la propia actividad estacional de estas laderas o puede ser el resultado de una cierta cantidad de humedad atrapada en esas regiones de la superficie de Marte. Las señales espectrales que se observan son consistentes con la presencia de perclorato de magnesio, clorato de magnesio, así como perclorato de sodio. El instrumento Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS), a bordo de la misión Mars Express,

encontró en la región Planum Australe una salmuera de perclorato atrapada debajo del hielo del polo sur marciano, lo que demuestra que el agua líquida puede permanecer estable a una profundidad de aproximadamente 1.5 km, incrementando con ello el interés por la exploración de Marte. Esa agua enriquecida con altas concentraciones de sales de perclorato define a una salmuera.

La información del cuadro 1 indica que Marte se encuentra un poco más alejado del Sol que la Tierra y por ello recibe menos radiación solar, lo que lo hace un planeta más frío. Su tamaño es ligeramente menor al de la Tierra en un 10% y gira sobre su propio eje en poco más de 24 horas, lo que provoca que su día sea más largo que un día terrestre; pero completa una órbita alrededor del Sol en casi dos años terrestres. La gravedad en su superficie es de sólo un tercio de la gravedad de la Tierra. La atmósfera marciana contiene principalmente dióxido de carbono (CO_2), un poco de argón (Ar) y nitrógeno molecular (N_2). La exploración realizada por diversas misiones robóticas ha permitido identificar algunos compuestos orgánicos en su superficie, así como salmueras y agua líquida en el subsuelo. Alrededor de Marte orbitan los satélites naturales Fobos y Deimos.

Los organismos extremófilos

El descubrimiento de organismos que habitan en ambientes extremos ha hecho más plausible la búsqueda

Cuadro 1. Parámetros principales de Marte y la Tierra.

Parámetro	Marte	Tierra
Distancia al Sol (10 ⁶ km)	228	150
Periodo orbital (días terrestres)	686.971	365.256
Periodo de rotación	24 h 37 m	23 h 56 m 4.1 s
Masa (kg)	6.4171 × 10 ²³	5.972 × 10 ²⁴
Densidad media (g/cm ³)	3.93	5.514
Radio ecuatorial (km)	3 397	40 075
Gravedad en la superficie (m/s ²)	3.711	9.807
Inclinación axial	25.19°	23.44°
Temperatura en la superficie (K)		
Mínima	130	184
Media	210	288
Máxima	308	330
Presión en la superficie (kPa)	0.636	101.325
Compuestos orgánicos	Clorobenceno en ppb Dicloroalcanos (C ₂ -C ₄) en ppb	Abundantes y diversos
Composición atmosférica (% volumen)	95 CO ₂ , 1.93 Ar, 1.89 N ₂ , 0.146 O ₂ , 0.056 CO, 0.021 H ₂ O _v , 0.01 NO _x	78.08 N ₂ , 20.95 O ₂ , 1.00 H ₂ O _v , 0.93 Ar, 0.04 CO ₂ , 0.00182 Ne, 0.00052 He, 0.00017 CH ₄ , 0.00011 Kr, 0.00006 H ₂
Agua líquida	Salmueras en la superficie y en el subsuelo	Océanos, mares, lagos, ríos, acuíferos
Satélites naturales	Fobos y Deimos	La Luna

queda de vida fuera de la Tierra. Los organismos extremófilos pueden ser clasificados de acuerdo con la condición fisicoquímica en la que proliferan (cuadro 2).

Los organismos halófilos

Los ambientes salinos están ampliamente distribuidos en la Tierra, por lo que existe una gran diversidad de organismos adaptados a diferentes valores de salinidad, a los que se ha denominado halófilos y tienen representantes en los dominios *Archaea*, *Bacteria* y *Eukarya*, aunque son más abundantes en los dos primeros, los cuales incluyen organismos microscópicos unicelulares. La halofilia se define en términos de la concentración de cloruro de sodio (NaCl) presente en un ambiente específico; a partir de esa concentración, los organismos halófilos se clasifican en tres categorías: halotolerantes, para quienes la presencia de sal no es un requerimiento; halófilos moderados y halófilos extremos.

En la naturaleza, los ambientes hipersalinos corresponden con lugares como el Mar Muerto (Israel), el Gran Lago Salado (EE. UU.), el Lago Solar

(Egipto), o pozas salinas como las encontradas en Baja California (México) y California (EE. UU.). La característica principal es la baja disponibilidad de agua, provocada por la alta concentración de solutos iónicos disueltos (sales). Por ello, los organismos halófilos que se desarrollan en estos hábitats han desarrollado estrategias de adecuación que les permiten proliferar en estos ambientes.

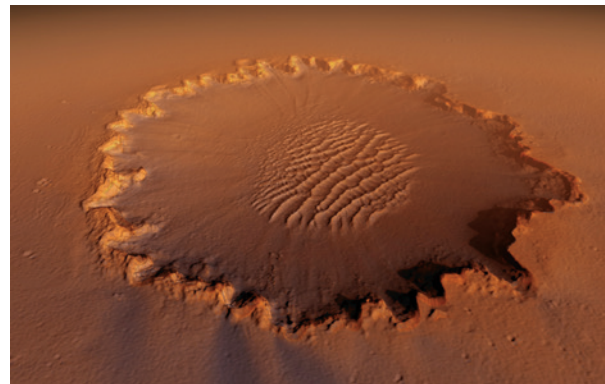
Cuadro 2. Clasificación y ejemplos de organismos extremófilos.

Parámetro ambiental	Tipo de extremófilo	Tolerancia
Temperatura	Hipertermófilo	> 80 °C
	Termófilo	60-80 °C
	Psicrófilo	< 15 °C
Radiación	Radorresistente	> 5 000 Gray
Presión	Barófilo	20 MPa
Desecación	Xerófilo	a _w = 0.6
Salinidad	Halófilo moderado	0.6-2.5 M NaCl
	Halófilo extremo	2.5-5.0 M NaCl
pH	Acidófilo	pH > 9
	Alcalófilo	pH < 6

Estrategias de halotolerancia

Químicamente hablando, existe una gran cantidad de sustancias, distintas al NaCl, a las que genéricamente se les puede llamar *sal*. Al NaCl se le conoce coloquialmente como sal de mesa, pero se trata sólo de un ejemplo de muchas otras sustancias químicas que los especialistas identifican como sales. Cuando una bacteria se encuentra en un medio con una alta concentración de sales, internaliza iones positivos como sodio o potasio (Na^+ , K^+), o negativos como cloruro (Cl^-), a manera de un mecanismo de primera respuesta para contrarrestar rápidamente el flujo de agua de su citoplasma hacia el exterior de la célula, evitando con ello la deshidratación. Una vez que alcanza un balance osmótico, es decir, que logra equilibrar la cantidad de iones en su citoplasma con la cantidad de iones del exterior, la bacteria reemplaza a los iones inorgánicos por pequeñas moléculas orgánicas, llamadas solutos compatibles.

Los solutos compatibles acumulados en el citoplasma bacteriano son moléculas neutras que no interfieren con las funciones celulares. Se utilizan principalmente para mantener el turgor celular y dar estabilidad a enzimas y biomoléculas en presencia de altas concentraciones de sal. Pueden ser sintetizados por las bacterias que los utilizan o pueden internalizarlos desde el medio en que se encuentran los microorganismos. Los solutos compatibles acumulados preferentemente por bacterias halófilas o halotolerantes incluyen azúcares, alcoholes, aminoácidos o algún derivado de este tipo de moléculas. Entre ellos,



los más comunes son la betaína, la ectoína, la hidroxiectoína, la glutamina, la trehalosa y el glutamato (véase la Figura 2).

La otra estrategia para contender con el estrés osmótico es la acumulación de cloruro de potasio (KCl), un ejemplo de otra sal utilizada por bacterias halófilas extremas y arqueas. Estos organismos han adquirido características que les permiten proliferar en ambientes con concentraciones mayores a 2.5 M de NaCl: acumulan iones K^+ y Cl^- en su citoplasma, al tiempo que mantienen una baja concentración de iones Na^+ . Las arqueas aerobias halófilas del orden Halobacteriales acumulan KCl en concentraciones tan altas como las concentraciones de NaCl que se encuentran en el medio que las rodea. Las bacterias del orden Halanaerobiales, que incluyen principalmente a bacterias fermentadoras y homoacetogénicas anaerobias, utilizan esta estrategia prefiriéndola sobre la acumulación de solutos compatibles debido a que esta última es energéticamente más costosa y estos organismos generalmente se desarrollan en ambientes con baja disponibilidad de recursos energéticos.

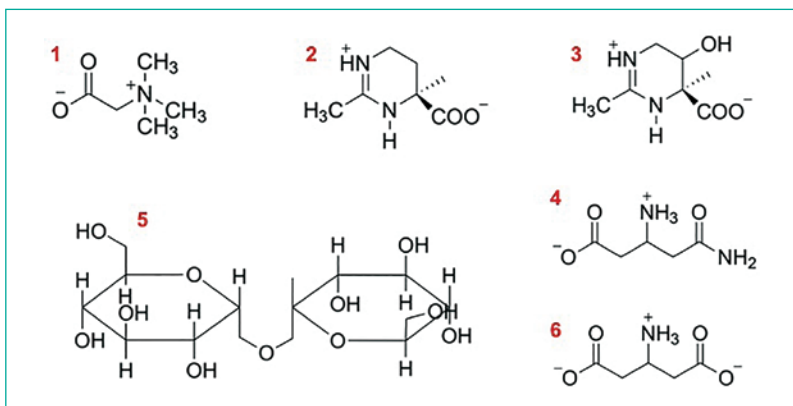


Figura 2. Solutos compatibles acumulados por bacterias halófilas o halotolerantes: 1) betaína, 2) ectoína, 3) hidroxiectoína, 4) glutamina, 5) trehalosa, y 6) glutamato.

Los modelos bacterianos y la tenacidad de la vida

En 2008 la misión Phoenix de la NASA descubrió la existencia de cloratos (ClO_3^-) y percloratos (ClO_4^-) en la superficie de Marte. Estos compuestos químicos tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de agua y formar salmueras o lodos enriquecidos con ellos, en la actual superficie marciana. Desde una perspectiva química, la combinación de ClO_3^- o de ClO_4^- con algún metal como sodio (Na), mag-

nesio (Mg), o potasio (K) origina una sal, distinta del NaCl, pero sal al fin y al cabo. Para evaluar si el agua atrapada por los cloratos y los percloratos de la superficie de Marte puede facilitar la proliferación de alguna forma de vida como la conocida en la Tierra, en el Laboratorio de Simulación de Ambientes Planetarios (CIQ-UAEM) consideramos como modelo de estudio a la bacteria halotolerante *Bacillus pumilus* y a la bacteria halófila *Cobetia marina*, con el fin de determinar su capacidad de sobrevivir a las condiciones de salinidad, definida por dos distintas sales de perclorato, de la actual superficie del planeta Marte. Se prepararon medios de cultivo modificados con diferentes concentraciones de perclorato de sodio (NaClO_4) y de perclorato de magnesio ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$) en los que se colocaron a las bacterias. Durante algunas semanas se realizaron observaciones minuciosas de los medios de cultivo hasta que comenzó a notarse una marcada turbidez, indicativa de que las bacterias iban aumentando en número. Esto significaba que esos pequeños seres habían logrado sobreponerse, no sólo a la concentración de perclorato reportada para la superficie de Marte, sino que fueron capaces de crecer en medios que contenían hasta 17 veces esa concentración; ¿cómo lograron hacerlo?

Las herramientas químicas en acción

■ En el Centro de Investigaciones Químicas de la UAEM se ubica el Laboratorio Nacional de Estructuras de Macromoléculas, que cuenta con instrumentos altamente especializados para determinar, entre otras cosas, la identidad de muchas sustancias químicas. La información proporcionada por esos instrumentos permitió establecer que cuando *Bacillus pumilus* y *Cobetia marina* son expuestas a la concentración de percloratos que se encuentra en la superficie del planeta rojo, el soluto compatible que incorporan en mayor cantidad es la betaína, seguida de la ectoína y cantidades menores de hidroxiectoína (Figura 2). Además, cuando la concentración de perclorato disminuye, se nota una mayor acumulación de ectoína, pero si la concentración de perclorato aumenta, la acumulación de ectoína disminuye y se nota un aumento en la cantidad de betaína y de hidroxiectoína.

Estos resultados permiten proponer que estas bacterias halófilas terrestres podrían sobrevivir a las condiciones de salinidad de la actual superficie de Marte. ¿Podrían sobrevivir a las otras condiciones ambientales marcianas? No lo sabemos aún, pero seguimos investigando. Este tipo de experimentos podrían apoyar a los grandes proyectos de exploración de Marte y tal vez motiven a las jóvenes generaciones a incorporarse a estos retos intelectuales, como alguna vez ocurrió con el ejemplo y las enseñanzas de un gran científico mexicano, el doctor Rafael Navarro González, quien formó parte de algunas de las más relevantes misiones de exploración de Marte y que afirmaba que hay que atreverse a soñar, ya que con dedicación y empeño los sueños se cumplen.

A manera de conclusión

■ Las regiones que mantienen agua enriquecida con sales de percloratos y cloratos en el subsuelo de Marte han inspirado el estudio de las capacidades de adecuación de bacterias halófilas terrestres, estudios cuyos resultados indican que, en términos exclusivamente de la salinidad, la vida terrestre tiene posibilidades de subsistir potenciando la exploración y colonización del planeta rojo.

Sandra Ignacia Ramírez Jiménez

Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

ramirez_sandra@uaem.mx

Lecturas recomendadas

Montoya, L. y S. I. Ramírez Jiménez (2013), “Vida microscópica en mundos salados”, *Ciencia y Desarrollo*, marzo-abril, 39:7-14

Ramírez Jiménez, S. I., M. Aguirre Ramírez y P. U. Martínez Pabello (2021), “Marte: experimentos de simulación y misiones de exploración espacial”, *Inventio: La Génesis de la Cultura Universitaria en Morelos*, 17(43):13-29.

Montoya, L., G. Cordero y S. I. Ramírez (2022), “Astrobiología. Una visión transdisciplinaria de la vida en el universo”, en *Astrobiología: una visión transdisciplinaria de la vida en el universo*, México, FCE/UNAM/ICN.

José Alfredo Rojas Vivas, Pablo Martínez Sosa y Paola Molina Sevilla

Las huellas de la vida en el planeta rojo

La búsqueda de vida fuera de nuestro planeta se ha centrado en Marte. A lo largo de la historia hemos cambiado su estudio de los telescopios al desarrollo de misiones espaciales, cuyos resultados sugieren que dicho planeta pudo albergar vida en su pasado. En este texto mencionaremos algunas misiones y los hallazgos más relevantes que nos han aportado evidencias para la identificación o no de vida en este planeta.

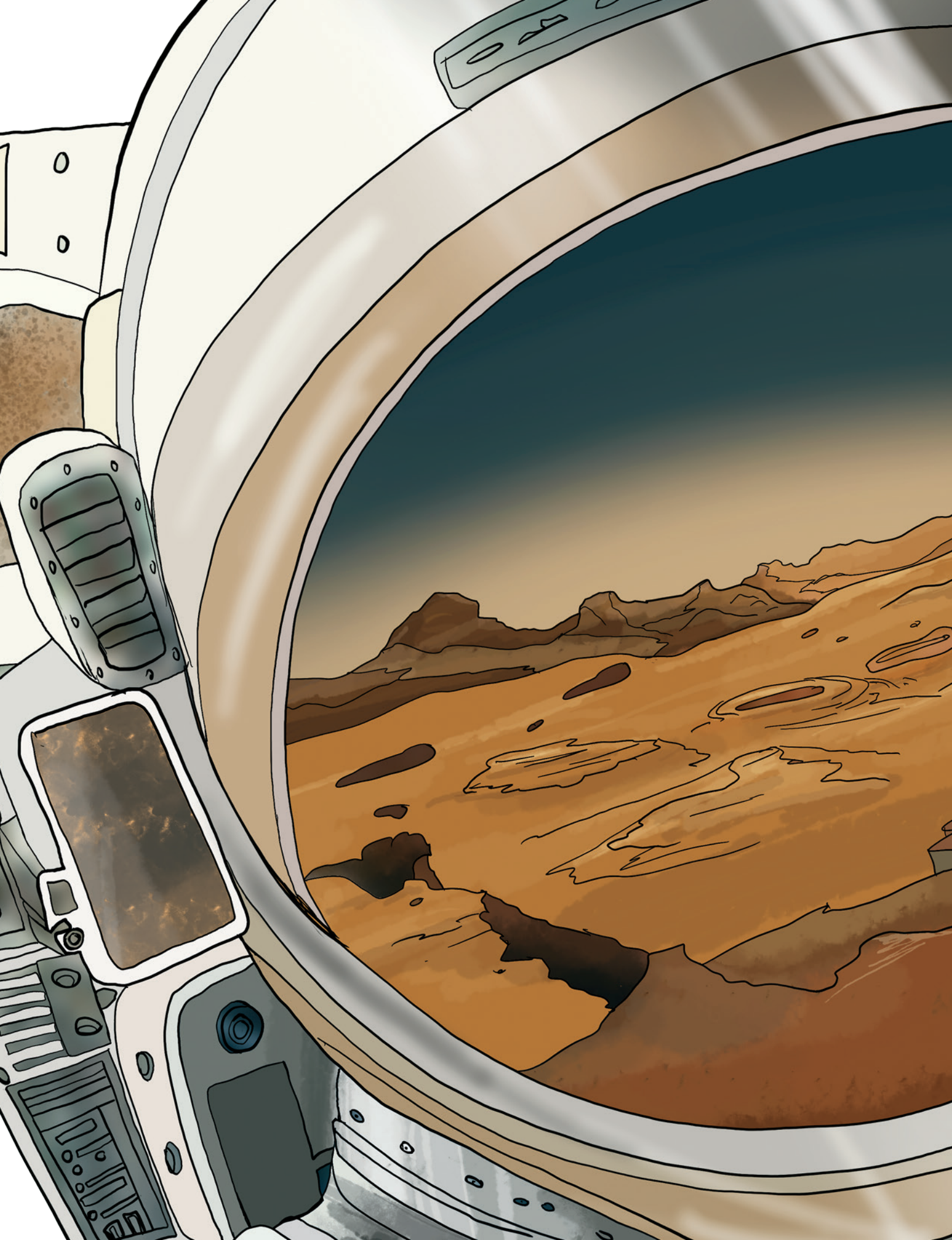
Introducción

A lo largo del tiempo, la humanidad se ha preguntado: ¿estamos solos en el universo? En diversos contextos se ha llegado a respuestas distintas, ya sea invocando principios filosóficos, ideas religiosas, o hipótesis basadas en principios físicos, lo cual no es sorprendente para una pregunta tan complicada. Aunque a la fecha sigue siendo una pregunta abierta, los esfuerzos que científicos alrededor del mundo continúan haciendo para detectar señales de vida en otros planetas nos permiten acercarnos cada vez más a una posible respuesta.

Gracias a los avances en astronomía y física en las últimas décadas, ahora tenemos una gran cantidad de información sobre el universo y esto nos ha permitido darnos cuenta de que tanto nuestro sistema solar como nuestro planeta no son particularmente únicos dentro del cosmos. Esto sugiere que hay una probabilidad considerable de que exista vida en otros planetas y que pudieran existir civilizaciones avanzadas. Sin embargo, a la fecha no hemos detectado evidencia de que exista vida microscópica o compleja fuera de nuestro planeta. Esta aparente contradicción fue notada desde 1951 por Enrico Fermi, a la cual se le denominó Paradoja de Fermi.

Con un enfoque similar, en 1961, Frank Drake ideó una relación matemática que estima la posible cantidad de civilizaciones inteligentes extraterrestres en el universo, considerando algunas características específicas de las galaxias, estrellas y planetas que pudieran dar lugar al desarrollo de vida inteligente, tomando como





ejemplo a la propia humanidad, pues somos el único ejemplo conocido.

Ante esta problemática, ha surgido una nueva disciplina llamada astrobiología, que ha tomado como directriz entender el origen, evolución y distribución de la vida en el universo. Actualmente sólo conocemos el 5% del universo y la única región a la que hemos podido enviar instrumentos científicos es nuestro propio sistema solar. De acuerdo con lo anterior, la astrobiología sugiere que existen lugares potenciales donde pudo haberse originado o existido vida, por ejemplo: el planeta Marte, dos lunas de Saturno (Titán y Encélado) y una luna de Júpiter (Europa). De todos ellos, el que presenta mayor factibilidad para la exploración es Marte, por su cercanía. A pesar de que se encuentra relativamente cerca, hemos tenido la necesidad de crear nuevos tipos de instrumentos capaces de realizar observaciones y experimentos de forma remota para poder comenzar a explorar el planeta vecino. En este artículo iremos dando cuenta de los avances y retos que ha representado para la comunidad científica la búsqueda de vida en el planeta rojo.

■ Los telescopios, primeros indicios

■ Las primeras observaciones del planeta rojo fueron realizadas en 1610 por Galileo Galilei, quien utilizando su telescopio refractor observó solamente un disco de color rojo. Posteriormente y junto con la invención de mejores telescopios reflectores, se realizaron observaciones un poco más claras de la superficie marciana, llegando a inferirse algunas propiedades planetarias, como su tamaño, masa, periodo de traslación (tamaño de su órbita), periodo de rotación (duración de su día). Asimismo, se han inferido algunos procesos en su superficie que podrían indicar la presencia de agua líquida. La posibilidad de agua líquida en la superficie y de una atmósfera densa hizo que los astrónomos consideraran factible que existiera vida en la superficie marciana. Esta idea tomó fuerza gracias a que, en 1877, Giovanni Virginio Schiaparelli describió una serie de estructuras en la superficie marciana con características similares a “canales”, que asoció a una formación natural por flujo de agua.

En el contexto de las grandes obras de ingeniería realizadas a finales del siglo XIX, como la construcción del canal de Suez y el canal de Panamá, las observaciones de Schiaparelli influyeron para que en 1906 Percival Lowell, un aristócrata americano aficionado a la astronomía, interpretara esas líneas observadas en Marte como canales construidos de manera artificial por una civilización alienígena inteligente que habitaba en el planeta rojo.

En esa época, se propagó la noticia de que se había encontrado evidencia de la existencia de vida inteligente en Marte, dando pauta para que los escritores de la época dejaran volar su imaginación y publicaran trabajos alusivos a la vida marciana.

■ La era espacial, un gran desencuentro

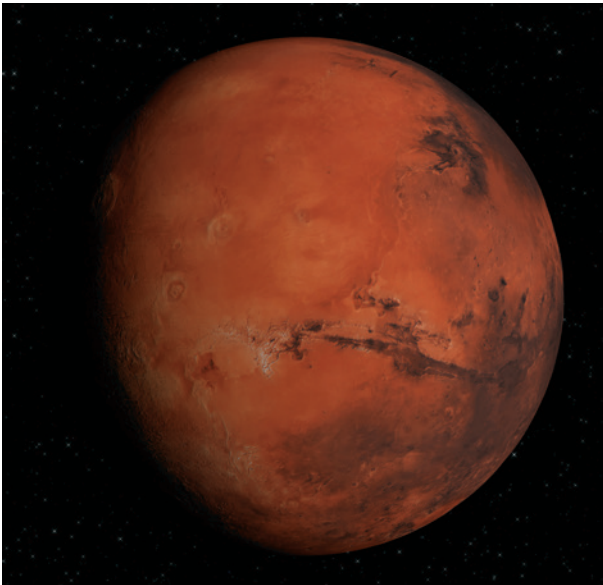
■ La llegada de la era espacial fue un parteaguas para los estudios sobre Marte. En la década de los 60 del siglo pasado, la primera nave en orbitar Marte fue la misión Mariner 4, en la que se tomaron 22 fotografías que dejaban al descubierto un sitio con muchos cráteres de impacto de meteoritos, sin rastro alguno de canales y mucho menos de grandes obras de ingeniería realizadas por alguna civilización inteligente. Poco después, las misiones Mariner 6, 7 y 9 pudieron explorar con mayor detalle, obteniendo un total de 7 530 imágenes de la superficie y caracterizando el clima. Quedó así claro que la superficie marciana es un desierto seco, frío, con formación de dunas y prácticamente hostil para la vida. Estas observaciones descartaron la posibilidad de vida inteligente en Marte; sin embargo, aún era posible que existieran microorganismos capaces de tolerar las condiciones extremas del planeta.

El análisis minucioso de las imágenes obtenidas mostró rasgos geológicos que sugerían que en el pasado Marte pudo haber contenido grandes cuerpos de agua líquida e incluso un ciclo hidrológico, además de haber tenido fuentes de energía, tales como el vulcanismo e impactos de meteoritos. Estas características pudieron prevalecer el tiempo suficiente para que se originara vida en el pasado del planeta rojo e incluso mantenerla de alguna forma hasta la actualidad. Por tal motivo, se desarrolló la misión

de exploración espacial Viking, conformada por dos naves gemelas, cada una de las cuales se componía de un orbitador y un módulo de aterrizaje. Viking ha sido la primera y única misión espacial en buscar vida microscópica en otro planeta.

Los dos módulos Viking eran propiamente laboratorios de análisis que, además de otros instrumentos, contenían tres equipamientos diseñados específicamente para identificar la presencia de actividad biológica en la superficie marciana, usando como referencia la vida microscópica de nuestro planeta. Los experimentos a realizar se conocían como “liberación pirolítica”, “liberación de gases marcados” e “intercambio de gases”.

Con la liberación pirolítica se deseaba investigar la posible presencia de metabolismos similares a la fotosíntesis terrestre. Para ello se incubaron muestras de la superficie marciana, en presencia de CO_2 o CO marcados radiactivamente, agua y luz, para investigar si podrían ser incorporados a compuestos orgánicos. El experimento denominado “liberación de gases marcados” pretendía investigar la presencia de metabolismos similares a la respiración microbiana. En este último experimento se investigó si la adición de nutrientes marcados radiactivamente a muestras de la superficie del planeta rojo generaría la liberación de varios gases con la marca radiactiva que en la Tierra se asocia a una actividad micro-




biana. Finalmente, el experimento de intercambio de gases consistía en identificar si la vida –de haberla– podía generar CO_2 debido al metabolismo en presencia de vapor de agua y una solución de nutrientes.

A pesar de que los resultados de los tres experimentos de detección de vida parecieron consistentes con la presencia de vida, se tenían que conciliar con la ausencia total de carbono orgánico mostrada por un instrumento de análisis también presente en los módulos. Esta última evidencia puso en tela de juicio los resultados de los experimentos biológicos, porque si existiera vida en Marte tendría que estar compuesta por carbono orgánico, como ocurre con todos los organismos vivos en nuestro planeta. Los resultados de Viking fueron catalogados como controversiales; no obstante, tiempo después se demostró que la detección de los compuestos organoclorados del análisis químico y los resultados obtenidos por los experimentos biológicos de las misiones Viking podría ser la causa de la actividad de compuestos oxidantes presentes en la superficie de Marte.

Con la intención de dar respuesta a los controversiales resultados de la misión Viking, se utilizaron muestras de distintos suelos análogos a los de la superficie marciana y se dedujo que las condiciones de operación del instrumento de análisis químico de Viking no fueron las adecuadas; además, los instrumentos eran poco sensibles para detectar los componentes orgánicos presentes en los suelos, pero en baja concentración. En Marte, el instrumento detectó pequeñas cantidades de moléculas organocloradas, las cuales en un principio fueron asociadas a contaminación terrestre, puesto que las naves en la Tierra fueron esterilizadas con cloro.

Una gran pista: seguir el agua

 El agua líquida, junto con fuentes de energía y bioelementos son considerados requerimientos para el origen y sostén de la vida en cualquier lugar del universo. En la superficie marciana ya se habían identificado formaciones geológicas que delatan la presencia de agua líquida en el pasado del planeta. Para establecer un nuevo camino en la búsqueda de vida en este planeta, tratando de evidenciar la ac-

tividad de agua líquida mediante la identificación de minerales formados en ambientes acuosos, las misiones Pathfinder y Mars Exploration Rovers encontraron evidencia de estos minerales (hematita y jarosita) en sitios cercanos al ecuador marciano, adonde fueron enviadas. En 2003 la NASA lanzó la misión Phoenix al permafrost marciano, muy cerca de su polo norte, donde encontró evidencia de minerales carbonatados, los cuales sólo se pueden formar por la solubilización de dióxido de carbono en agua líquida y aquí en la Tierra por la actividad biológica, lo que hizo resurgir la idea de que Marte pudo haber tenido las condiciones para el surgimiento de la vida en su pasado.

Phoenix logró identificar sales de perclorato, sustancias altamente oxidantes que habrían producido los compuestos organoclorados identificados anteriormente por la misión Viking. Esto, debido a que los percloratos liberan oxígeno al ser calentados, generando la combustión de compuestos orgánicos y causando su oxidación. Surge así la necesidad de proponer nuevas técnicas de análisis de materia orgánica que no involucren un calentamiento del suelo, con el fin de evitar una oxidación de ésta por la presencia de percloratos.

Con base en el mismo principio de seguir el agua, se preparó la misión Mars Science Laboratory, cuyo vehículo de exploración (*rover*, en inglés), nombrado Curiosity, llegó a la superficie marciana en 2012. Curiosity ha podido realizar diferentes hallazgos, entre los que destacan la detección de compuestos organoclorados en su sitio de aterrizaje. Así mismo, logró identificar por primera vez un compuesto químico llamado tiofeno, que consiste en una molécula compuesta por carbono, hidrógeno y azufre, acomodados en forma de anillo (Figura 1). El azufre del tiofeno le confiere estabilidad a la molécula, ayudando a su preservación por miles de millones de años en el suelo marciano. Aunque el *rover* no tiene la capacidad para distinguir el origen de este compuesto, se cree que pudo formarse por alteración química de posibles compuestos orgánicos del pasado de Marte, cuya alteración es debida al intenso vulcanismo.

De Marte a la Tierra

Al momento sólo se ha explorado la superficie marciana y gracias a ello se han podido inferir algunos procesos geológicos que han marcado la evolución de este planeta con el paso del tiempo. Además, los

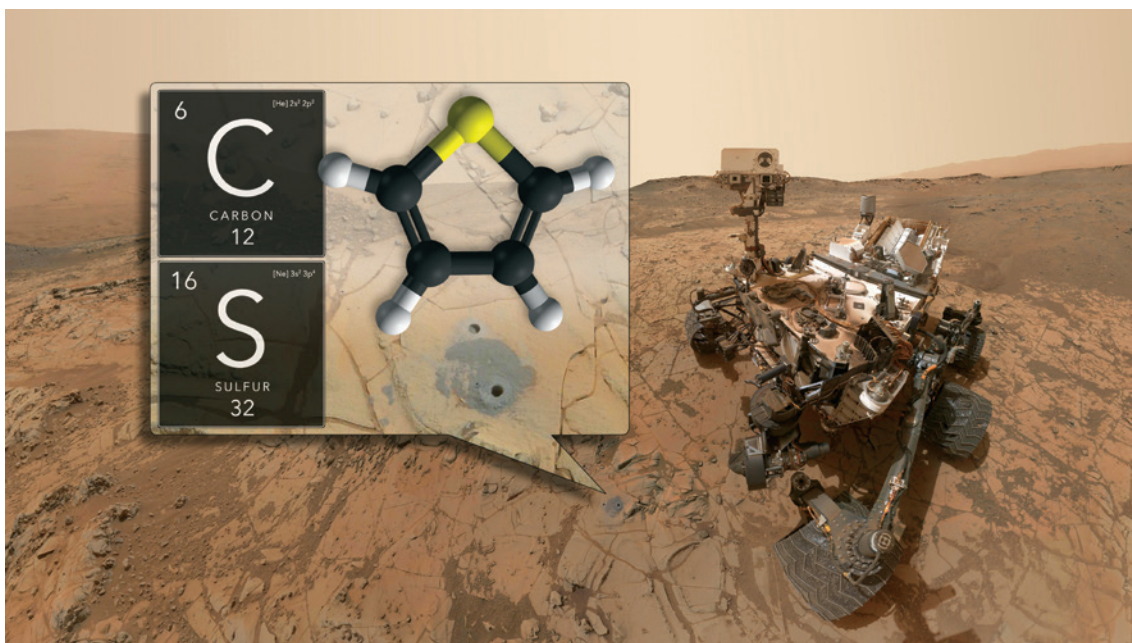


Figura 1. El *rover* Curiosity detectó tiofeno, un compuesto orgánico conservado en rocas sedimentarias dentro del cráter Gale, cuya edad de formación se estiman es de más de 3.5 mil millones de años. Crédito: NASA/GSFC.

análisis *in situ* de la superficie han ayudado a identificar diferentes tipos de compuestos orgánicos. Pero con la instrumentación de estos robots, no se puede asegurar si tales compuestos orgánicos tuvieron su origen por procesos puramente químicos propiciados por el entorno marciano, o si fueron originados por la acción de organismos vivos actuales o del pasado de Marte, cuando se tenían las condiciones para sostener vida en su superficie. Para resolver esta incógnita, se preparó la misión Mars 2020 –con su *rover* de nombre Perseverance–, la cual tiene como principal objetivo la búsqueda incansable de compuestos orgánicos importantes para la vida; además de realizar una colecta de muestras que retornarán a la Tierra para analizarlas con diferentes técnicas y métodos mucho más específicos y sensibles, con el fin de esclarecer su origen.

Actualmente, Perseverance ha logrado identificar en el sitio de aterrizaje, el cráter Jezero, una variedad de compuestos orgánicos posiblemente originados por procesos abióticos (no biológicos). También ha colectado un total de 43 muestras de suelo marciano, las cuales podrá encapsular para que posteriormente puedan ser enviadas a nuestro planeta mediante la misión Mars Ascent, proyectada para el año 2030 (Figura 2).

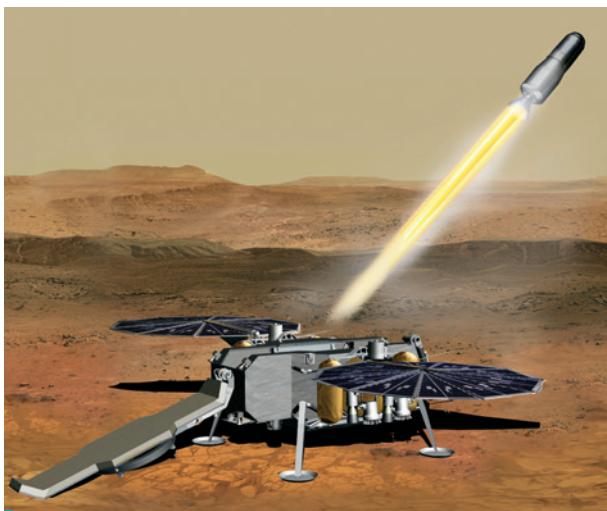


Figura 2. Misión Mars Ascent. Concepción artística que muestra cómo el módulo de aterrizaje de la misión lanza fuera de la superficie marciana el vehículo de ascenso donde se transportan las muestras de rocas y suelo de Marte. Crédito: NASA/JPL-Caltech.

Ante la dificultad de encontrar huellas biológicas o moléculas orgánicas esenciales para la vida, se ha propuesto explorar capas más profundas del suelo marciano, considerando que Marte no posee una capa de ozono o magnetosfera que proteja su superficie de los rayos cósmicos ni ultravioleta, radiación que podría promover la degradación de estos componentes, además de los oxidantes ya detectados. Algunos experimentos recientes sugieren que el mismo suelo brinda un escudo protector ante la radiación, preservando las posibles huellas de la vida y que a más de metro y medio de profundidad podría encontrarse un acervo de compuestos orgánicos. Con base en esta premisa, se tiene planeada la misión ExoMars, la cual explorará el subsuelo marciano, llevando consigo un taladro capaz de perforar hasta dos metros de profundidad. Estaremos entonces a la espera de la llegada de las muestras marcianas y de esta nueva misión con el propósito de encontrar evidencia directa de vida y abonar a la respuesta de si ¡estamos solos o no en el universo!

José Alfredo Rojas Vivas

Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM.
alfredo.rojas@ciencias.unam.mx

Pablo Martínez Sosa

Universidad de Utrecht, Países Bajos.
p.martinezsosa@uu.nl

Paola Molina Sevilla

Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM.
paolams@ciencias.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Eigenbrode, J. L. *et al.* (2018), “Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale crater, Mars”, *Science*, 360(6393):1096-1101.
- McKay, C. P. (1997), “The search for life on Mars”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 27(1): 263-289.
- Navarro-González, R. (2005), “Búsqueda de vida en Marte”, *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 8(2):82-90.

Mundos habitables más allá del sistema solar

Hemos detectado más de 5 mil exoplanetas que nos han maravillado con su diversidad y nos preguntamos si entre ellos habrá alguno que sea habitable. Para comprender todas las posibilidades, requerimos estrategias que nos permitan identificar esos mundos e instrumentos que nos permitan hacer realidad la detección de vida en ellos.

La vida como la conocemos

Hubo una vez un planeta cubierto por un océano de lava y envuelto en vapor de agua, golpeado constantemente por enormes rocas provenientes del espacio. Mientras la lluvia de rocas espaciales cesaba, la superficie de roca fundida se enfrió, y el mundo se cubrió de tierra y océano. En ese mundo, los compuestos que se encontraban en la atmósfera, la tierra y el agua, se combinaron y concentraron hasta formar a los primeros seres vivos.

Ésta es la historia de la Tierra, formada hace 4 500 millones de años y donde tenemos evidencia de que la vida surgió hace unos 3 500 millones de años. Una de las preguntas que nos hacemos en la astrobiología es si pueden existir otros mundos donde la vida pueda surgir y evolucionar; es decir, mundos habitables, y para responderla estudiamos el fenómeno de la vida terrestre, la única que conocemos. La vida en la Tierra puede generalizarse considerando que está hecha de moléculas de carbono y requiere agua líquida para que éstas se encuentren, reaccionen y se acumulen. Este requerimiento no es extraordinario, pues el carbono es el cuarto elemento más abundante del universo, y en los lugares donde se forman los planetas y las estrellas el agua es un compuesto abundante que se encuentra como gas o hielo. Aplicando la generalización de la vida en la Tierra, un planeta potencialmente habitable debe tener carbono y agua líquida; el primero es muy abundante, así que lo damos por hecho; en cambio, la presencia de agua líquida requiere condiciones mucho más específicas.

Mundos habitables

Tenemos un solo ejemplo de vida, pero muchos planetas para explorar la diferencia entre ellos y nuestro mundo. Marte, por ejemplo, fue similar a la Tierra en el





pasado. Hace 4 000 millones de años las atmósferas de ambos estaban compuestas de bióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2), tenían agua líquida en su superficie y volcanes activos. Pero Marte tiene una décima parte de la masa terrestre y su gravedad no pudo retener a la atmósfera. Entre los impactos de asteroides, el viento solar y reacciones químicas con la superficie marciana, la atmósfera se fue perdiendo hasta quedar sólo una tenue capa cuya presión no era suficiente para mantener agua líquida en la superficie. Además, el efecto invernadero causado por el CO_2 en la atmósfera también disminuyó, enfriando el planeta. Ahora Marte es un desierto helado donde el agua se encuentra congelada en los polos y en la superficie. Nuestro vecino nos da las primeras lecciones sobre habitabilidad planetaria. Una es que un planeta habitable puede dejar de serlo. La segunda es

que la atmósfera es fundamental para proveer la presión y temperatura suficientes para mantener agua líquida en la superficie.


Venus tiene una masa y radio similares a los de la Tierra, pero su atmósfera es mucho más masiva (92 veces, para ser exactos). En este mundo la temperatura superficial es de $462\text{ }^\circ\text{C}$, el agua está en forma de gas y es poca, pero hay datos que indican que en el pasado tuvo mucha más agua que se escapó al espacio. Su problema fue su distancia al Sol (0.72 veces la distancia entre la Tierra y el Sol). Nuestra estrella ha ido aumentando lentamente su luminosidad y lo seguirá haciendo durante otros 5 000 millones de años más. De manera que cuando se formaron los planetas, el Sol era 25% menos brillante que ahora. Si un planeta mantiene la cantidad de gases de efecto invernadero en su atmósfera, pero recibe más energía de su estrella, entonces aumentará su temperatura. En Venus esto provocó que el agua se evaporara causando un “efecto invernadero desbocado”. El agua, al igual que el CO_2 , es un gas de efecto invernadero. Si el planeta se calienta, hay mayor evaporación de los océanos, el vapor de agua atmosférico aumenta la temperatura, lo que incrementa la evaporación y así sucesivamente hasta que toda el agua de la superficie se evapora. En la atmósfera, los componentes del agua (hidrógeno y oxígeno) son separados por la radiación ultravioleta (uv) del Sol, y el hidrógeno se va escapando lentamente hacia el espacio haciendo imposible recuperar el agua. Venus nos muestra que la energía que recibe un planeta de su estrella debe ser suficiente para calentarlo, pero no tanto para que inicie un efecto invernadero desbocado. Si la radiación que recibe el planeta es muy poca, entonces el planeta se congelará.

Así, tenemos dos requisitos para un mundo habitable: que tenga una masa suficiente para retener una atmósfera con gases de efecto invernadero y que reciba suficiente energía de su estrella para que el agua no se congele ni se evapore a escala global. Podemos pensar en otros cuerpos del sistema solar; por ejemplo, Júpiter, un gigante compuesto de hidrógeno y helio donde hay agua pero ésta se encuentra en una baja proporción y en condiciones extremas

de presión y temperatura. Así pues, el tercer requisito de nuestro mundo habitable será que sea un mundo con una superficie sólida; es decir, hecho de roca, como la Tierra, Venus o Marte.

Los ejemplos del sistema solar no sólo nos sirven para establecer las características de un mundo habitable, sino también para construir un concepto fundamental para la astrobiología: la zona habitable (ZH). La ZH es la región alrededor de una estrella en la que un planeta rocoso con atmósfera recibe suficiente energía estelar para mantener agua líquida en su superficie (Kopparapu y cols., 2013). Esta zona nos da una primera aproximación respecto a la estrategia de búsqueda de planetas potencialmente habitables, pero tiene limitaciones. Para calcularla se requieren modelos numéricos que simulan atmósferas con composiciones específicas; la más común es de CO_2 , N_2 y agua, porque ésa es la más probable para planetas rocosos. Hoy en día los cálculos de la ZH se han ampliado para incluir otras variables; por ejemplo, la cantidad de radiación UV que le llega al planeta o la cantidad de agua que contiene en la superficie o composiciones atmosféricas distintas.

Más allá del sistema solar

 Con estas herramientas, podemos iniciar nuestra búsqueda de mundos habitables alrededor de otras estrellas, mundos a los que llamamos “exoplanetas”. Hemos detectado más de 5 000 y sus características nos han sorprendido. Para entender su diversidad, volvamos al sistema solar. Aquí hay de tres “sabores”: los rocosos (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), los de hidrógeno y helio (Júpiter y Saturno) y los gigantes helados (Neptuno y Urano), hechos de una combinación de hielos de agua, amoníaco, metano y roca. Curiosamente, los exoplanetas más comunes tienen radios y masas mayores a los de la Tierra, pero menores a los de Neptuno. En el sistema solar no hay nada igual. El reto es saber si estos mundos son versiones pequeñas de Neptuno, minineptunos, o versiones gigantes de la Tierra; o sea, supertierras. Las supertierras serían mundos rocosos capaces de retener atmósferas de hidrógeno molecular (H_2). Otra posibilidad es que sean planetas océano. Por su



aparición, podría pensarse que la Tierra es un mundo océano, pero en realidad es una roca seca, pues menos del 1% de su masa es agua, mientras que los planetas océano tendrían porcentajes de agua mucho mayores.

Una pregunta pertinente es si algunos de estos mundos podrían ser habitables. Ciertamente, un mundo océano tiene mucha agua y una supertierra podría mantener agua líquida en su superficie. Aquí es cuando los modelos de habitabilidad se hacen más complejos. Por ejemplo, hay un debate alrededor de la existencia de vulcanismo en las supertierras. El vulcanismo permitiría reciclar la atmósfera que reacciona químicamente con la superficie, quedando “atrapada” en ella. Un mundo sin vulcanismo eventualmente perdería su atmósfera. En los mundos océano, en cambio, la falta de una superficie de roca

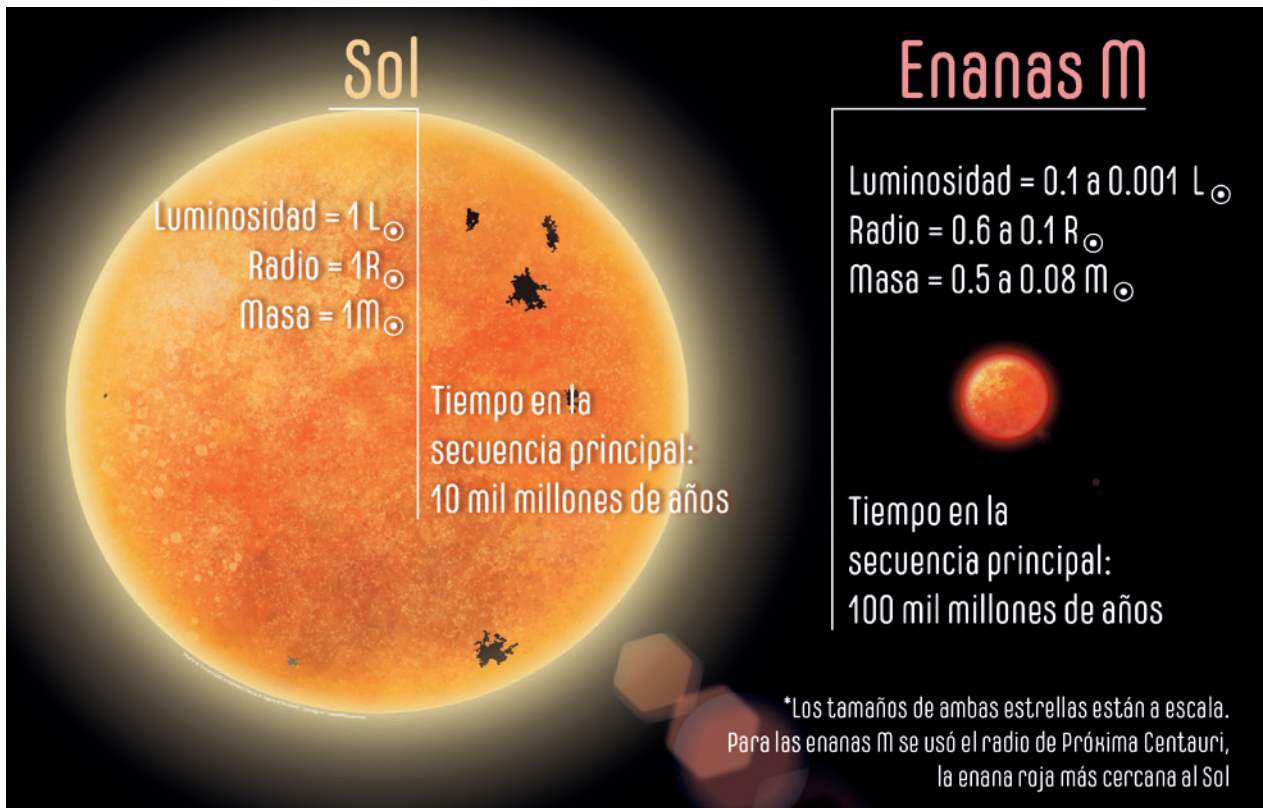


Figura 1. Características de las enanas M comparadas con el Sol.

podría hacer imposible el origen de la vida, pues se ha demostrado que la interfaz de la superficie y el océano fue fundamental para concentrar compuestos que eventualmente formaron las primeras células. Otra posibilidad es que la vida haya surgido en volcanes submarinos donde el agua a altas temperaturas y presiones disolvió minerales que resultaron indispensables para la vida, como el hierro y el azufre. Los mundos océano podrían proveer ambientes similares si tienen zonas donde el fondo del océano esté en contacto con roca, pero esto es sólo una posibilidad; el agua también podría estar en forma de hielo o un superfluido, de manera que no necesariamente serían oasis para la vida.

Bajo la luz de otra estrella

Al igual que los planetas, las estrellas también vienen en muchos tamaños. Las más pequeñas se llaman enanas M o enanas rojas debido a su color, y nos importan porque son casi el 75% de las estrellas

en la vecindad solar y, por si fuera poco, la mayoría de los planetas considerados potencialmente habitables están alrededor de ellas. Sus características generales pueden verse en la Figura 1. Las enanas M, al igual que el Sol, están en una etapa llamada secuencia principal, en la que obtienen energía a partir de la conversión de hidrógeno en helio. Durante esta etapa las estrellas aumentan lentamente su luminosidad de manera que proveen una cantidad de energía relativamente estable que puede aprovecharse en un planeta para ser habitable. Una vez que consumen el hidrógeno en sus núcleos, las estrellas sufren cambios que vuelven imposible la vida en sus planetas. Las enanas M se mantienen en la secuencia principal por mucho más tiempo que una estrella como el Sol (Figura 1), lo que permitiría que la vida surja y evolucione. Su baja luminosidad implica que su ZH estará mucho más cerca de la estrella, comparada con la de una estrella como el Sol (Figura 2). Cuando una estrella y su planeta se encuentran así de cerca, el planeta va frenando su rota-

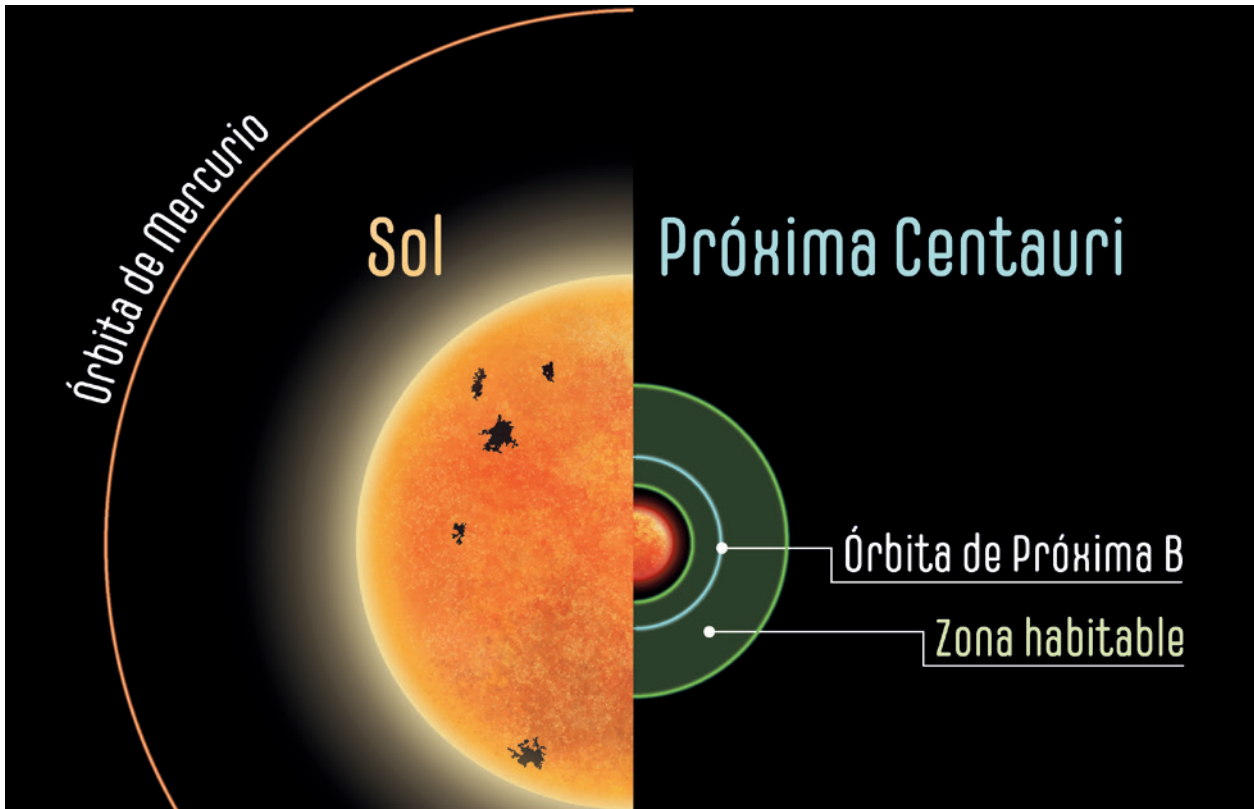


Figura 2. Comparación de la órbita de Próxima b con la órbita de Mercurio, el planeta más cercano al Sol. La zona habitable de Próxima Centauri se muestra en verde. El tamaño de las órbitas comparado con el de las estrellas no está a escala.

ción hasta que ésta se sincroniza con su translación. Esto le sucedió al sistema Tierra-Luna y por eso hay una cara de la Luna que nunca vemos. En el caso de una estrella y su planeta habrá un hemisferio que siempre esté iluminado y otro no. Durante un tiempo se pensó que esto haría que el planeta fuera inhabitable, pues la atmósfera estaría muy caliente de un lado y se escaparía al espacio, mientras que del otro lado se congelaría y depositaría en la superficie. Pero se demostró que una atmósfera tenue de CO₂ podría distribuir el calor de un hemisferio al otro de manera que estos planetas podrían ser habitables. Sin embargo, las enanas M seguían siendo ignoradas en las listas de estrellas para buscar planetas potencialmente habitables.

A principios de este siglo pasaron dos cosas: una fue que las técnicas observacionales favorecieron la detección de planetas menos masivos alrededor de enanas M y la otra fue descubrir que la radiación UV que emitían estas estrellas daba como resultado una química atmosférica particular. Resulta que las en-

anas M producen mucha más radiación UV de la que deberían porque la mayoría de ellas son “activas”. La actividad estelar se debe a que el campo magnético de la estrella interacciona con la atmósfera estelar provocando que ésta emita más rayos X y UV de lo esperado. El trabajo que realicé con James Kasting (Universidad Estatal de Pensilvania) y más tarde con el grupo dirigido por Victoria Meadows (Universidad de Washington), sobre la química atmosférica de planetas alrededor de enanas M, reabrió las puertas no sólo para estudiar el potencial de habitabilidad de sus planetas, sino también para estudiar más a detalle a estas estrellas y los efectos que su actividad tiene en la habitabilidad planetaria (Segura, 2010). En la UNAM, mi grupo de trabajo estudia el potencial de habitabilidad de estos exoplanetas y el efecto de la actividad estelar en la química atmosférica y la formación de compuestos relevantes para la vida. Para ilustrar la complejidad de estudiar la habitabilidad de exoplanetas, vayamos al sistema planetario más cercano al Sol.



La vecina de al lado

Próxima Centauri es una enana M activa a sólo 4.2 años luz de distancia y alrededor de ella se encuentra Próxima b (los exoplanetas se nombran como su estrella más una letra que se elige a partir de la b, según se van descubriendo). Próxima b tiene apenas un 7% más masa que la Tierra y cae dentro de la famosa zona habitable, pero ¿es un mundo habitable? Bueno, en principio no sabemos si es un mundo rocoso. Para restringir su composición necesitamos su masa y su radio, y sólo tenemos la primera. Además,

los instrumentos actuales no nos permiten saber si tiene atmósfera. Lo que sí sabemos es que una estrella como ésta, antes de iniciar la etapa de secuencia principal fue mucho más brillante y luego bajó su luminosidad, y en ese entonces debió de emanar mucha más radiación en forma de rayos X y uv. Esto implica que en sus inicios el planeta debió de recibir suficiente energía para que se evaporara su agua y quizás también para que perdiera su atmósfera, aunque esto depende de la cantidad inicial de ambas, cosa que desconocemos. Por otro lado, la radiación

uv emitida por Próxima Centauri durante esta etapa pudo ser la fuente de energía para que se dieran los primeros pasos hacia el origen de la vida en su planeta, suponiendo que el agua y la atmósfera hayan sobrevivido. La comunidad astrobiológica ha explorado varios escenarios para Próxima b, pero la respuesta llegará hasta que tengamos observaciones que nos digan si este exoplaneta tiene una atmósfera y cuál es su composición. Los modelos servirán entonces para interpretar las observaciones y establecer el potencial de habitabilidad de Próxima b.

Un mundo habitable

Los telescopios más avanzados hoy en día tienen muchas limitaciones para observar atmósferas de planetas potencialmente habitables. El JWST es el mejor instrumento que tenemos en el espacio y puede estudiar de forma limitada algunos exoplanetas rocosos (JWST son las siglas de James Webb Space Telescope). Una parte de la comunidad astronómica ha protestado por este nombre porque J. W. no fue científico y participó activamente en la exclusión de personas de la comunidad LGBTQ+ de la NASA y otras entidades de gobierno. A pesar de las múltiples solicitudes, el nombre se mantuvo y como protesta

usamos sólo las siglas o lo llamamos *Just Wonderful Space Telescope*). Será hasta la siguiente generación de telescopios, tanto en la superficie como en el espacio, cuando podremos estudiar estas atmósferas y establecer si los planetas son habitables y, tal vez, encontrar huellas de actividad biológica.

Por primera vez en la historia de la humanidad tendremos la posibilidad de saber si a nuestro alrededor hay mundos habitados. Pero hay que recordar que si encontramos mundos habitables, no lo serán para los humanos. La Tierra es el único mundo habitable para la humanidad y de nosotros depende que continúe siéndolo.

Antígona Segura

Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM.

antigona@nucleares.unam.mx

Lecturas recomendadas

Landau, E. (2021), “¿Estamos solos en el universo?”, NASA. Disponible en: <https://ciencia.nasa.gov/universo/estamos-solos-en-el-universo/>, consultado el 6 de diciembre del 2023.

López Suárez, P. (2023), “¿Existe vida en otros planetas?”, *Gaceta UNAM*, 5379:10.

Antígona Segura y Christopher McKay



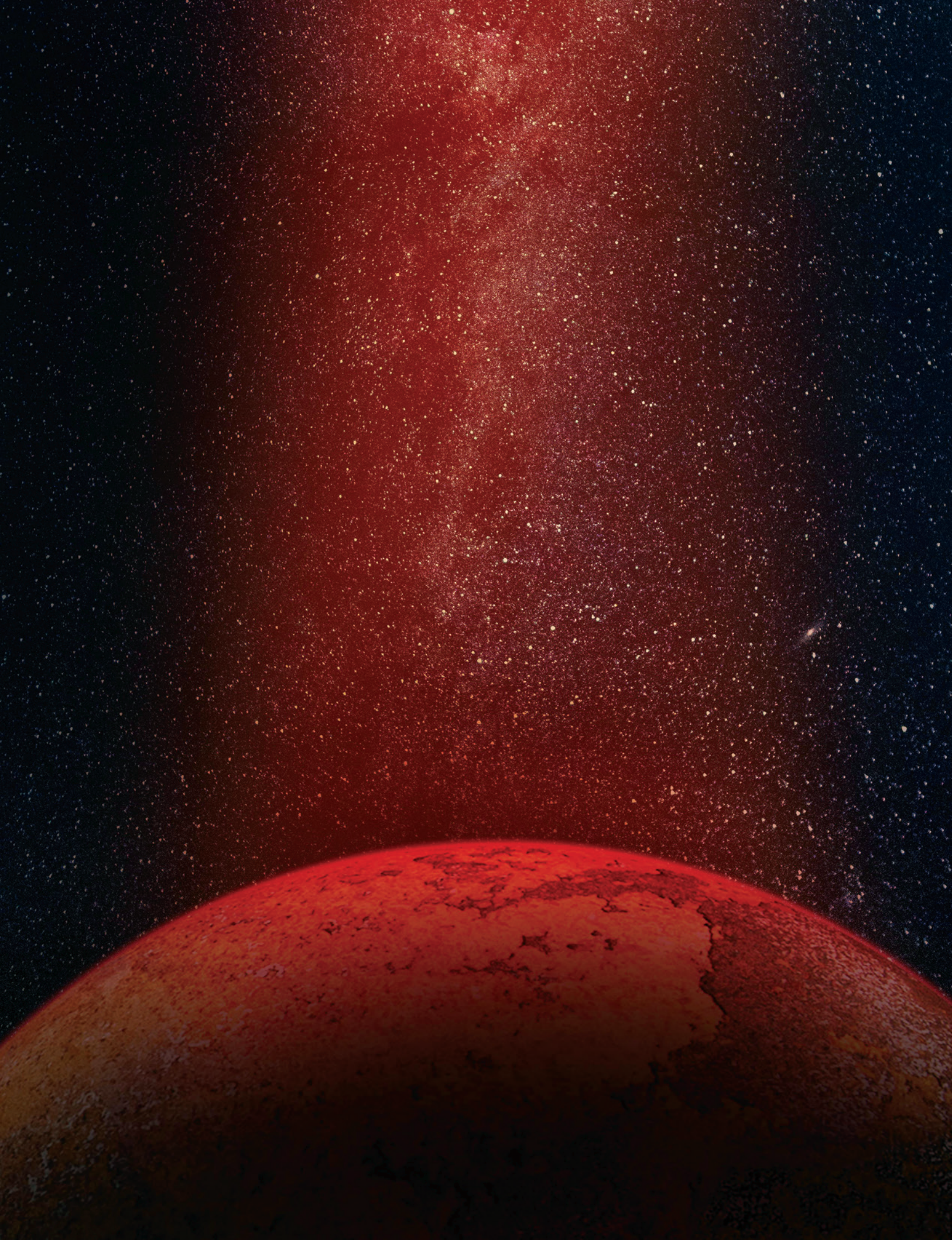
Rafael Navarro: de la Tierra a Marte

La curiosidad de Rafael Navarro González lo condujo a estudiar la posibilidad de que exista vida en otros lugares del sistema solar. Marte fue su mundo favorito y gracias a su investigación la NASA modificó sus planes para la misión Curiosity, detectando por primera vez compuestos de carbono en Marte que confirman el potencial de este planeta para generar vida.

En enero de 2021 perdimos a un investigador que llevó a México hasta el planeta vecino, Marte. Siendo un joven estudiante de biología, a finales de los 70, se emocionó al escuchar a Cyril Ponnampertuma, uno de los investigadores más relevantes en el tema del origen de la vida por sus estudios sobre la química que dio origen a los bloques que constituyeron a los primeros seres vivos. Una vez graduado como biólogo en la Facultad de Ciencias de la UNAM, Rafael estudió el doctorado en química en la Universidad de Maryland, invitado por Ponnampertuma. Al regresar a México, ya con doctorado, fundó el Laboratorio de Química de Plasmas y Estudios Planetarios, en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM.

La búsqueda de vida en Marte fue uno de los mayores intereses científicos de Rafael. Este interés lo llevó hasta el desierto de Atacama, un lugar donde casi nunca llueve, con un suelo rico en óxidos de nitrógeno y azufre. Ahí encabezó un grupo de investigación que descubrió que este desierto contiene vida microbiana muy limitada y mostró que sus suelos tienen una capacidad de oxidación similar a la de los suelos marcianos. Con su artículo sobre el desierto de Atacama, Rafael y sus colaboradores sentaron las bases para el estudio de Atacama como un lugar análogo a Marte desde 2003.

Más tarde, esa investigación lo llevaría hasta Marte. Rafael estaba intrigado por los resultados del experimento de las naves Viking que visitaron Marte en 1976. En esos experimentos se obtuvieron resultados aparentemente contradictorios, en los que un instrumento reportó que no se detectó material orgánico, pero los experimentos biológicos indicaron la presencia de oxidante. Cuando en el 2009 se reportó que la misión Phoenix había identificado altas concentraciones de compuestos de cloro muy oxidados (percloratos) en el suelo marciano, Rafael de inmediato lo conectó



con los experimentos del Viking. Repitiendo las condiciones del famoso experimento en la presencia de percloratos, Rafael y sus colaboradores demostraron que éstos habrían reaccionado con cualquier posible materia orgánica al calentarse las muestras durante el análisis. Los resultados de este análisis fueron fundamentales para la operación de la siguiente misión de la NASA a Marte, llamada Curiosity, la cual contenía un sistema para el análisis de material orgánico. Rafael fue integrado como coinvestigador a la misión y al fallecer, el equipo decidió nombrar a una montaña en su honor, en su planeta favorito, Marte (Figura 1).

Su investigación abarcó otros lugares del sistema solar, como Titán, la luna naranja de Saturno –rea-

lizados con Sandra Ramírez Jiménez y sus colaboradores en Francia, Francois Raulin y Patrice Coll–, el océano de Europa, satélite de Júpiter –realizados con Lilia Montoya–, por mencionar algunos, así como de la Tierra en el pasado, con investigaciones en las que colaboró con el premio Nobel, Mario Molina, y más tarde con Delphine Nna Mvondo. Su laboratorio fue un lugar donde todas las disciplinas eran apreciadas y valoradas, y en el que muchas personas encontraron su vocación y se formaron como científicas.

Rafael Navarro fue un científico excepcional que hizo contribuciones que influyeron en los estudios sobre el origen de la vida y la astrobiología; un ejemplo de alguien dedicado a la ciencia que no dejó de



Figura 1. Montaña Rafael Navarro en Marte. Crédito: NASA/JPL-Caltech/MSSS (imagen PIA24544).

lado su lado humano, pues fue también un padre y esposo devoto. Sin duda, un ejemplo para ésta y futuras generaciones.

Antígona Segura

Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM
antigona@nucleares.unam.mx

Christopher McKay

NASA Ames Research Center, EUA
Christopher.P.McKay@nasa.gov

Referencias específicas

Navarro-González, R. *et al.* (2003), "Mars-like soils in the Atacama Desert, Chile, and the dry limit of microbial life", *Science*, 302(5647):1018-1021.

Navarro-González, R. *et al.* (2010), "Reanalysis of the Viking results suggests perchlorate and organics at midlatitudes on Mars" *Journal of Geophysical Research: Planets*, 115: E12010.

Lecturas recomendadas

Segura, A. (2008), "Un laboratorio de otro mundo", *¿Cómo ves?*, 10(121):8-15.





Novedades científicas

De actualidad

Desde la UAM

Desde las redes

Noticias de la AMC

Odalys Julissa Ibarra-Alejos y René Ventura-Houle



Bacterias devoradoras de petróleo

El petróleo es un hidrocarburo que ha sido una fuente de energía explotada y utilizada para la creación de productos como la gasolina, plásticos y telas sintéticas, por mencionar algunos. Sin embargo, el petróleo y sus derivados son tóxicos y pueden llegar a ser cancerígenos y mutagénicos. Han ocurrido derrames de petróleo en agua y suelo debido a la exploración, extracción, transporte y refinación de este hidrocarburo, lo que se ha convertido en un peligro ambiental y social. Existen, no obstante, organismos diminutos capaces de limpiar el agua y el suelo de esos contaminantes y de contribuir a la recuperación del ambiente de forma más rápida, permitiendo que éstos ya no causen daño.

Introducción

Los microorganismos son organismos microscópicos, los seres más pequeños en la Tierra. Estos organismos tienen funciones diferentes y muy importantes en el planeta, ya que gracias a ellos podemos contar con numerosos servicios, como la fermentación de alimentos, la descomposición de materia orgánica, la generación de energía y la creación de combustibles, entre muchos otros. Dentro de los microorganismos podemos encontrar bacterias, algas, hongos, levaduras y protozoarios, los cuales se encuentran de forma natural en los ecosistemas. Existen diferentes microorganismos capaces de degradar o transformar los contaminantes que se encuentran en el ambiente en sustancias menos tóxicas, restaurando los sitios en donde ocurrió una contaminación. Esto pueden lograrlo mediante diferentes mecanismos, como la degradación directa, la producción de enzimas o biosurfactantes (cabe resaltar que las bacterias son las principales productoras de biosurfactantes), compuestos que ayudan a que los contaminantes estén disponibles para los microorganismos con mayor facilidad y puedan utilizarlos como fuente de energía, metabolizando los compuestos y haciendo que estas sustancias dejen de estar disponibles en el ambiente, con lo cual disminuyen el riesgo que representan para otros organismos, incluyendo al ser humano.

Contaminación por petróleo en el agua

En el agua se pueden encontrar diversos contaminantes, producidos principalmente por actividades realizadas por el hombre. El agua ha sido contaminada con desechos orgánicos (por ejemplo, las heces fecales del humano y de sus animales domésticos), así como diversos desechos inorgánicos provenientes de la industria, como plásticos, metales pesados, pesticidas, sales o hidrocarburos.

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos. El petróleo, por su parte, es una mezcla compleja de hidrocarburos, el cual es utilizado como fuente de energía a nivel mundial, razón por la que ha sido tan explotado. Sin embargo, a pesar de ser una fuente de energía proveniente de sustancias orgánicas, y una materia prima de la que se derivan productos como la gasolina, telas sintéticas, plásticos, entre muchos otros, se puede convertir en un problema ambiental debido al mal manejo en su extracción, transporte y refinación, provocando derrames en el agua y en el suelo.

Al ingresar en el agua, el petróleo forma una capa densa y oleosa que, por un lado, evita el paso de la luz solar e impide el intercambio gaseoso indispensable para la vida acuática y que, por otro lado, ocasiona la muerte de peces y otros animales acuáticos al recubrir sus cuerpos y órganos vitales (piel, plumaje, branquias, etc.), además de ser un compuesto tóxico, cancerígeno, mutagénico y **bioacumulable**.

El petróleo, en especial el de fracción pesada, suele ser más difícil de degradar para los microorganismos. Algunos ejemplos de petróleo de esta categoría incluyen el petróleo crudo, el *fuel oil* (producido a partir de la refinación del primero, utilizado como combustible en la industria marítima o en plantas de energía eléctrica) y el asfalto, que se usa comúnmente para la construcción de carreteras. Por otro lado, el petróleo de fracción ligera es del que se derivan combustibles como el gas natural, o bien puede usarse como materia prima para la producción de gasolina.

Se han desarrollado métodos para la eliminación de estos compuestos en los cuerpos de agua, tales como los métodos fisicoquímicos, herramienta que a pesar de ser útil en situaciones de emergencia, pueden ser de elevado costo. Muchos de estos métodos pue-

den llegar a generar subproductos tóxicos, por lo que resulta un problema mayor. Ante estas situaciones, se han buscado nuevas estrategias para la remoción de contaminantes, como la del petróleo en el agua.

Derrames de petróleo en México

En México se han registrado derrames de petróleo de gran magnitud; entre ellos destaca el derrame del pozo Ixtoc I. Este incidente ocurrió en 1979 en un pozo exploratorio de petróleo ubicado en el golfo de México, específicamente en el estado de Campeche, a 94 km al noroeste de Ciudad del Carmen. Dicho derrame afectó las costas de Campeche, Veracruz, Tabasco, Tamaulipas y algunas zonas de Texas. Además, han ocurrido otros derrames de petróleo que si bien no se originaron en territorio mexicano, sí han afectado sus costas; tal es el caso del Deepwater Horizon (DWH) (una plataforma semisumergible de perforación en aguas profundas para la extracción de petróleo), en donde más de 4 millones de barriles de petróleo crudo se derramaron en el golfo de México en 2010. Fue el mayor derrame que se ha registrado en el mar.

Actualmente siguen ocurriendo derrames de petróleo, aunque de menor magnitud. El último reporte en el anuario estadístico de Pemex reporta que en 2019, entre fugas y derrames, sucedieron un total de 1 092 eventos y casi 900 millones de metros cúbicos fueron descargados al medio ambiente.

Los derrames de petróleo pueden causar serios problemas ambientales en diferentes ecosistemas. Un ejemplo del daño que pueden ocasionar los derrames de petróleo al ecosistema son las muertes de aves acuáticas, que se sumergen en el agua en busca de comida y sus plumas quedan cubiertas por el petróleo, lo que ocasiona que en muchos casos mueran por inmovilización (ver cuadro 1).

Biorremediación, una estrategia para la restauración de sitios contaminados

La remediación es el proceso de descontaminación de un sitio que utiliza tecnologías para la remoción de contaminantes que pueden encontrarse en el suelo,

Bioacumulable ▶ La bioacumulación es el proceso en el que sustancias químicas aumentan de concentración conforme van pasando de un organismo vivo a otro en la cadena alimenticia.

Cuadro 1. Derrames de petróleo en México

Evento	Año	Lugar	Cantidad derramada
Ixtoc I	1979	Campeche, México	560 millones de litros de petróleo crudo
DWH	2010	Luisiana, EUA	4 millones de barriles de petróleo crudo

Información tomada de: "Derrames de petróleo que han afectado las costas mexicanas," *Anuario estadístico 2019*, Pemex.

agua o aire. La remediación ayuda a remover, controlar, disminuir o eliminar los contaminantes presentes en el sitio afectado.

Las técnicas de remediación utilizadas pueden ser *in situ* o *ex situ*; es decir, que la remediación puede realizarse en el sitio de contaminación o bien fuera de este. Existen diferentes métodos para llevar a cabo la remediación, entre los cuales se encuentran: los fisicoquímicos y los biológicos, mejor conocidos como biorremediación.

Los métodos fisicoquímicos emplean diferentes herramientas, haciendo uso de disciplinas como la física y la química, de modo que, por ejemplo, podríamos usar una sustancia química para eliminar un contaminante presente en el agua; sin embargo,

el problema con algunas de estas tecnologías es que si bien ayudan a la remoción de contaminantes, también pueden provocar que la contaminación se agrave al introducir otras sustancias. Otro de los inconvenientes es su elevado costo, ya que pueden llegar a hacer uso de grandes maquinarias e infraestructuras, además de tener altos costos de operación y materiales, por lo que pueden resultar inaccesibles. Cabe resaltar que el empleo de estos métodos no degrada el contaminante, sino que suele retirarlo del sitio para descargarlo o almacenarlo en otro.

Por ello, la biorremediación surge como una alternativa para la degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos. Este término surge a principios de la década de 1980 y se refiere al método que hace



Figura 1. Derrame de petróleo del cráter del pozo petrolero de San Diego de la Mar, núm. 3, mejor conocido como Dos Bocas en Tamalín, Veracruz. Crédito: Odalys Julissa Ibarra Alejos.



Figura 2. El sitio del desastre petrolero ocurrido en Dos Bocas en julio de 1908 no ha sido hasta la fecha restaurado. Crédito: Odalys Julissa Ibarra Alejos.

uso de la capacidad de organismos vivos como los microorganismos para la degradación y eliminación de contaminantes presentes en el suelo, agua e incluso en el aire.

¿Qué pueden degradar los organismos vivos? La naturaleza es tan maravillosa que se pueden degradar los plásticos que han inundado muchos ecosistemas, los metales pesados tóxicos para el medio ambiente y la salud humana, así como las heces fecales provenientes de los desagües domésticos, de modo que se puede regresar el agua limpia a los ríos y mares a través de este procesamiento biológico tanto de los desechos que salen de nuestras casas como de los desechos industriales y, por supuesto, los hidrocarburos derramados en suelo o agua.

Para la biorremediación, pueden utilizarse plantas, hongos, bacterias, algas, o bien una combinación de ellos. Cada organismo tiene diferente capacidad para la acumulación y tolerancia de ciertos contaminantes en particular y diferentes mecanismos de acción. Un ejemplo de organismos utilizados en la biorremediación son los llamados “microorganismos benéficos”, los cuales son un conjunto de bacterias, hongos y levaduras que han sido previamente seleccionados y puesta a prueba su eficacia para la remoción de contaminantes en agua o suelo. Por ello, podríamos considerar a los microorganismos como una especie de conserjes de nuestro planeta, ya que se encargan de limpiar y mantener libre el agua y el suelo de sustancias no deseadas, brindándonos un valioso “servicio ambiental”.

Bacterias degradadoras de petróleo

Cuando consumimos un alimento, tenemos la capacidad de transformarlo en energía. Hay alimentos que nos brindan una mayor energía y que son muy útiles para nuestro organismo, ya que podemos digerirlos más rápido o fácilmente, mientras que hay otros que no son tan benéficos para nosotros, no nos gusta su sabor o no nos caen bien, y por estas razones muchas veces rechazamos su consumo. Algo similar pasa con los microorganismos: pueden llegar a alimentarse de diversas sustancias y metabolizarlas para transformarlas en su fuente de energía; sin embargo, tienen afinidad o preferencia por ciertos compuestos, mientras que hay otros que no pueden tolerar o no son de su agrado.

La diversidad de bacterias en nuestro planeta es enorme y existen algunas especies que tienen la capacidad de metabolizar compuestos como los hidrocarburos y transformarlos en sustancias menos tóxicas o disminuir su presencia en el ambiente. Utilizan enzimas, las cuales son moléculas que ayudan a que una reacción se lleve a cabo de una manera más rápida; es decir, las enzimas producidas por las bacterias participan en el proceso de degradación de los hidrocarburos.

Cuando ocurre un derrame de petróleo, los compuestos de bajo peso molecular –los cuales son los



Figura 3. Una muestra del derrame en el ecosistema de Dos Bocas, Veracruz. Crédito: Odalys Julissa Ibarra Alejos.

hidrocarburos alifáticos de cadena corta (como el butano o el metano)– se volatilizan dentro de las primeras horas después de ocurrido el derrame y suelen ser tóxicos para las bacterias, quedando los **hidrocarburos poliaromáticos** (como el naftaleno utilizado en la producción de insecticidas) y los heterocíclicos (por ejemplo, tiofeno, usado como aditivo en la industria de lubricantes y en agroquímicos), por lo que las bacterias que se encuentran en el sitio después de un derrame de petróleo son tolerantes y capaces de degradar estos compuestos. Sin embargo, cabe mencionar que el petróleo de fracción pesada e hidrocarburos de cadena larga (los cuales tienen mayor tendencia a permanecer en el medio ambiente después de un derrame) suelen ser más difíciles de degradar para las bacterias.

El petróleo puede llegar al agua por un derrame accidental o por afloración natural, cualquiera que

sea el caso; existen microorganismos, como las bacterias, que pueden participar en su degradación y que además pueden llegar a tener una alimentación exclusiva de petróleo. En el proceso de degradación participan diferentes especies de bacterias, de acuerdo con su preferencia por determinados hidrocarburos. Además de esto, otros factores importantes a considerar acerca de la degradación de petróleo son las condiciones ambientales y las propiedades fisicoquímicas del petróleo.

Pocos géneros bacterianos se han descrito como capaces de degradar los hidrocarburos poliaromáticos y heterocíclicos. Se han registrado eficiencias de degradación de petróleo por bacterias hasta del 95%. Algunos de los géneros de bacterias que se han documentado en la degradación de hidrocarburos son las *Marinobacter*, *Halomonas*, *Alcanivorax*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, entre otras. Cabe

◀ Hidrocarburos poliaromáticos

Compuestos orgánicos que contienen múltiples anillos aromáticos en su estructura molecular; se encuentran en diversos productos naturales y también se generan como productos de la combustión incompleta de materiales orgánicos, como el petróleo, el carbón, la madera y otros combustibles.

mencionar que esta área de investigación, conocida como “microbiología ambiental” o “microbiología aplicada al medio ambiente”, es muy activa pues con ella se pueden tener para remediar los graves daños ambientales que sufrimos actualmente.

Cepa bacteriana

Grupo de bacterias que pertenecen a la misma especie.

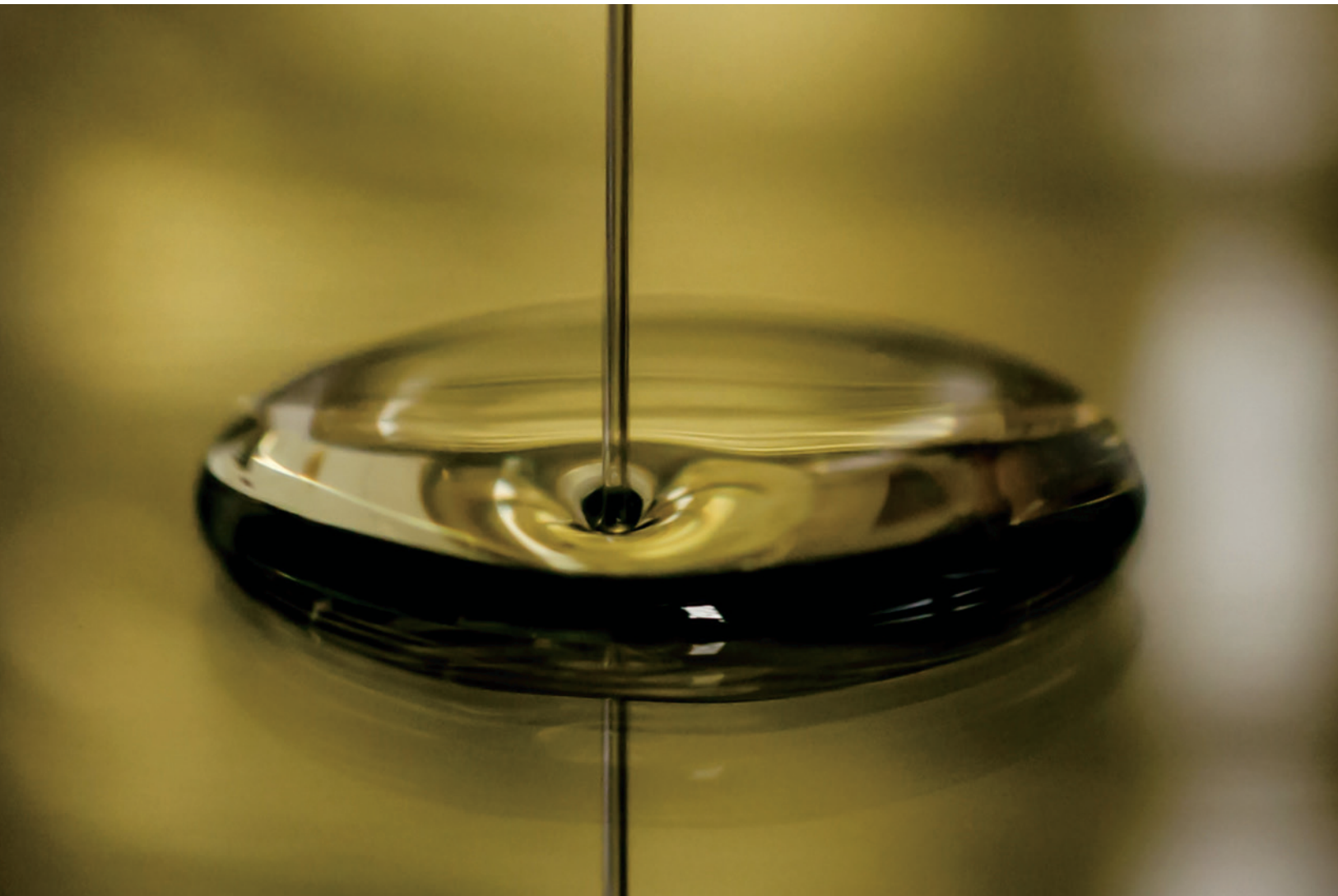
■ ■ ■ **Consortios bacterianos, ¿qué son?**

■ ¿Qué es un consorcio bacteriano y por qué se utiliza como una forma más eficaz para la biorremediación del petróleo en el agua? Como se mencionó antes, cierto grupo de bacterias prefieren determinados hidrocarburos, además las bacterias producen enzimas y biosurfactantes que ayudan en la degradación de los hidrocarburos; sin embargo, en ocasiones puede ser difícil que una sola especie de bacteria pueda degradar por sí sola estos compuestos. Por ello, se ha recurrido al uso de consorcios bacterianos.

Un consorcio bacteriano es una combinación de diferentes especies de bacterias. Se ha demostrado

que los consorcios bacterianos poseen conjuntos más amplios y poderosos de enzimas que una sola especie de bacteria. De igual forma, puede tener varias ventajas en cuanto a la producción de biosurfactantes; por ejemplo, las interacciones entre las diferentes **cepas bacterianas** pueden generar efectos sinérgicos que aumentan la producción de biosurfactantes, ya que algunas cepas pueden secretar sustancias que estimulan la producción de éstos en otras cepas, lo que lleva a una producción general más alta en comparación con una sola.

Cada especie bacteriana puede especializarse en la degradación de una fracción específica del petróleo, complementando las actividades de las demás. En otras palabras, las diferentes especies de bacterias pueden “hacer equipo” y trabajar en conjunto de modo que todas tienen un beneficio, dando como resultado una degradación más eficiente del hidrocarburo o petróleo gracias a que se generan compuestos intermediarios que pueden ser usados por otras



bacterias, y así sucesivamente, hasta completar la remoción de los compuestos tóxicos.

Conclusiones

Las bacterias, así como los microorganismos en general, juegan un papel muy importante en la degradación de petróleo en el ambiente, incluyendo el agua y el suelo. Los consorcios bacterianos pueden utilizarse como un método de biorremediación para llevar a cabo la degradación de contaminantes de manera más eficaz. Es importante conocer la forma en que trabajan las bacterias para generar estrategias de biorremediación que ayuden a recuperar y conservar los ecosistemas acuáticos y terrestres.

Odalys Julissa Ibarra Alejos

División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas.
alej.os.odalys@gmail.com

René Ventura-Houle

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas. reneh66@gmail.com

Referencias específicas

- Dai, X. *et al.* (2021), "Heavy oil biodegradation by mixed bacterial consortium of biosurfactant-producing and heavy oil-degrading bacteria", *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(1):71-80.
- García-Cruz, N. U. y M. L. Aguirre-Macedo (2014), "Biodegradación de petróleo por bacterias: algunos casos de estudio en el Golfo de México", en A. V. Botello, J. Rendón, J. A. Benítez y G. Gold-Bouchot (eds.), *Golfo de México: contaminación e impacto ambiental, diagnóstico y tendencias*, México, Universidad Autónoma de Campeche, pp. 641-652.
- Narváez-Flórez, S., M. L. Gómez y M. M. Martínez (2008), "Selección de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos aisladas a partir de sedimentos del Caribe colombiano", *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 37(1):63-77.
- Ozyurek, S. B. y I. S. Bilkay (2020), "Comparison of petroleum biodegradation efficiencies of three different bacterial consortia determined in petroleum-contaminated waste mud pit", *SN Applied Sciences*, 2(2):1-12.

Paula Sofía Villarreal Cantú

Insectos melíferos: no sólo las abejas producen miel

Se tiene registro de más de un millón de especies de insectos en todo el planeta y hoy día se reconoce su importante aportación para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, al igual que su influencia en las sociedades humanas. Los insectos han sido parte de nuestra alimentación, salud, cultura, así como proveedores de servicios ecosistémicos (beneficios directos o indirectos que los humanos obtenemos de la biodiversidad), y es aquí donde el tema de la miel adquiere pertinencia.

Las abejas son insectos que proporcionan múltiples beneficios a los humanos, ya que la colecta de la miel y otros productos derivados de la actividad apícola (la crianza y cuidado de abejas con la finalidad de conseguir miel, cera y polen, productos que las abejas elaboran o recolectan) son una importante actividad económica. Por ello, cuando pensamos en la miel, inmediatamente vienen a la mente las abejas; sin embargo, no son los únicos insectos melíferos. A lo largo de los años se ha tenido registro de ciertas especies de avispas y hormigas productoras de miel que también juegan un papel importante en las sociedades humanas.

Las abejas están incluidas en un grupo de insectos conocidos como himenópteros; el orden comprende a las abejas, avispas y hormigas, entre otros. Con base en sus características, éstos se agrupan en familias, subfamilias y tribus.

Abejas melíferas

Existen alrededor de 20 000 especies de abejas en todo el planeta, que se distribuyen en siete familias. La familia *Apidae* incluye a la subfamilia *Apinae*, la cual contiene diversas tribus, como la de las abejas sin aguijón (*Meliponini*), abejorros (*Bombini*), abejas melíferas (*Apini*), abejas de las orquídeas (*Euglossini*), entre otras. Las abejas sin aguijón y las melíferas son las responsables de formar colonias permanentes en donde se almacena miel y polen en vastas cantidades.



■ **Género *Apis***

■ Las abejas del género *Apis* incluyen 11 especies; éstas son nativas de Asia, a excepción de la abeja *A. mellifera*, la cual es originaria de África, Oriente Medio y Europa (excluyendo las regiones del norte de Europa). La *A. mellifera* es la especie más importante para los humanos, debido a que es responsable de que se pueda realizar la apicultura.



Figura 1. Abejas del género *Apis* sp. (Crane, 2009).

■ **Abejas sin aguijón (tribu *Meliponini*)**

■ La tribu de las *Meliponini* pertenecen a la subfamilia *Apinae* y son conocidas como “abejas sin aguijón”. Se distribuyen en los territorios tropicales y subtropicales de Australia, África, Asia y América; son, además, reconocidas por su comportamiento altamente social, al igual que la especie *A. mellifera*. Se caracterizan por presentar un aguijón reducido, alas con venación débil o reducida y ojos desnudos.

Debido a que las abejas sin aguijón presentan una producción de miel más escasa en comparación con las *A. mellifera*, la meliponicultura (cultivo de las abejas *Meliponini*) no es tan común como la apicultura de las abejas melíferas. Esto se puede deber también a que la miel de las abejas sin aguijón, en comparación con la de la abeja melífera, presenta una mayor acidez y cantidad de agua, por lo que la miel es más líquida y tiene un sabor distinto, normalmente más ácido. Sin embargo, existen antecedentes de meliponicultura en Nepal, Sri Lanka, Indonesia, India y Vietnam; además de que se sabe de mieleros con experiencia que llevan a cabo la recolección de su miel en nidales silvestres, así como de personas oportunistas que también la recolectan.

■ **Avispas de la subfamilia *Polistinae***

■ Regularmente, la miel suele estudiarse con un enfoque dirigido a las abejas y a pesar de que desde más de 200 años se tiene conocimiento de la producción de miel por avispas, hay poca información bibliográfica

de los géneros de la subfamilia *Polistinae* que coleccionan néctar y producen miel: *Brachygastra*, *Nectarina* y *Polybia*. Así pues, existe poca literatura disponible sobre el uso humano de la miel de las avispas como alimento y los registros existentes son en su mayoría relatos de sociedades indígenas, los cuales indican que no sólo en dichas sociedades se consume la miel, sino también las larvas y pupas de *Brachygastra* spp.

■ **Hormigas del género *Myrmecocystus***

■ Las hormigas del género *Myrmecocystus* son endémicas de los hábitats áridos y semiáridos del oeste de Estados Unidos y México. Son populares debido a las hormigas trabajadoras conocidas como “repletas” o *honeypots*, pues almacenan soluciones de azúcar, lípidos y proteínas en su abdomen. Se tiene conocimiento de que este “repletismo” también ocurre en al menos otros cinco géneros de hormigas, las cuales se asocian frecuentemente a ambientes áridos donde hay escasez de agua y alimentos.

Un ejemplo de estas hormigas mieleras es la especie *Myrmecocystus mexicanus*, en la cual existe un grupo conocido como “repletas”, pues presentan abdómenes enormes con una gran capacidad de estiramiento. Estas hormigas consumen mucha “ligamaza” (sustancia compuesta por glucosa y fructuosa), la cual almacenan en su abdomen para uso futuro del resto de la colonia. Por ello se les ha dado el nombre de “hormigas mieleras”. Su abdomen puede llegar a ser tan grande que existe la posibilidad de que pierdan la

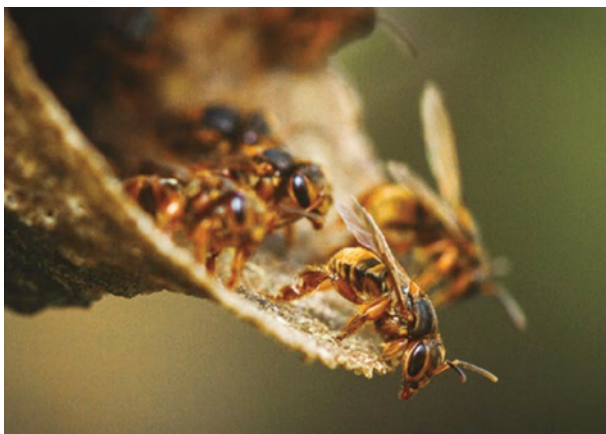


Figura 2. Abejas sin aguijón (Arnold et al., 2018).



Figura 3. Nido de avispas *Brachygastra mellifica* (Arnold et al., 2018).



Figura 4. Hormigas mieleras “repletas” (Pérez, 2017).

capacidad de caminar, por lo que suele vérselos colgando inmóviles del techo de las galerías del nido.

En México las hormigas mieleras son colectadas y transportadas para su comercialización, ya que se acostumbra consumir su néctar debido a su buen sabor. Además, se les atribuyen propiedades medicinales: se cree que la ingesta de su néctar puede curar enfermedades digestivas, óseas, otitis, inflamación en la boca y fiebre en los niños.

Conclusión

La principal producción de miel a nivel mundial se debe a la “abeja común” (*A. mellifera*), especie que ocupa gran parte de la actividad apícola del mundo debido a su eficiencia. Con todo, no es la única especie que presenta esta característica. En América las abejas nativas que nos brindan miel son las abejas sin aguijón, las cuales no sólo tienen un importante valor económico, sino también histórico y cultural. Se ha observado, no obstante, que sus poblaciones están disminuyendo a causa de factores como el cambio climático, los pesticidas y las especies exóticas, entre otros.

Además de las abejas, otros himenópteros, como las avispas y las hormigas, presentan la capacidad de producir miel. En general, las avispas se conocen principalmente por su aguijón y sus picaduras, pero se tiene registro de que son también fuente de miel en diversas sociedades indígenas; incluso, en algunos ca-

sos las pupas y larvas se utilizan para consumo humano. Por otro lado, las hormigas mieleras “repletas”, a diferencia de las avispas, tienen una importante presencia en comunidades humanas, pues su extracción y venta es fuente de ingreso económico y una actividad familiar transmitida de generación en generación y una tradición en diversas regiones de México.

La miel ha sido parte de las civilizaciones desde tiempos antiguos y es importante tener conciencia de que su obtención ha provenido de insectos distintos de las abejas, que tienen, además, un impacto en nuestras culturas e historia.

Paula Sofía Villarreal Cantú

Estudiante de la Licenciatura en Biología, Universidad de Sonora.
paulasofia051199@gmail.com

Referencias específicas

- Arnold, N., R. Zepeda, M. Vásquez-Dávila y M. Aldasoro-Maya (2018), *Las abejas sin aguijón y su cultivo en Oaxaca, México: con catálogo de especies*, México, Conabio.
- Costa de Bringas, M. C. (1986), “Contribución al conocimiento de mieles de avispas de la Provincia de Córdoba”, *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 24(3):355-361.
- Costa-Neto, E. M. (2004), “La etnoentomología de las avispas (*Hymenoptera, Vespoidea*) en el poblado de Pedra Branca, estado de Bahía, nordeste de Brasil”, *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, 34:247-262.
- Crane, E. (2009), “Apis Species: (Honey Bees)”, en V. Resh y R. Cardé (comps.), *Encyclopedia of Insects*, Amsterdam, Elsevier, pp. 31-32.
- Heiblum, A. (2019), “Abejas: insectos polinizadores”, *INCyTU*, 52(31):1-6.
- Nates-Parra, G. (2001), “Las abejas sin aguijón (*Hymenoptera: Apidae: Meliponini*) de Colombia”, *Biota colombiana*, 2(3):233-248.
- Pérez, G. (2017), “Hormigas miel”, *Rural MX*. Disponible en: <<https://ruraltv.com.mx/hormigas-y-miel/>>.
- Ramos-Rostro, B., S. Figueroa-Colín y H. Olgún-Arredondo (2009), “Extracción de hormigas mieleras (*Myrmecocystus mexicanus*): una reseña sobre el trabajo de campo en Santo Domingo, Axapusco, Estado de México”, *Revista Virtual Gastronómica*, 5:21-34.

El impacto del *nearshoring* en México: desafíos y oportunidades

El *nearshoring*, que implica trasladar procesos productivos a lugares cercanos a mercados principales, favorece significativamente a México pero implica también retos profundos. La situación actual presenta una oportunidad única para fortalecer la economía mexicana, pero exige estrategias que se adelanten a los cambios globales y apoyen el crecimiento sostenible y equitativo.

Desde hace décadas hay, entre historiadores profesionales, dos certezas ineludibles. La primera es que la historia nunca es definitiva. Los cambios pueden acelerarse o aletargarse, pero la dinámica de cambio no se detiene. La segunda es que para la mayoría de la gente el periodo histórico en que vive es definitivo e inescapable. Es humano no ser muy consciente de los cambios históricos de manera natural. El súbito protagonismo que el término *nearshoring* ha recibido en la discusión económica de los últimos meses obedece en parte a esta disyuntiva entre el proceso histórico y lo sorprendente que nos resulta el cambio.

Desde finales de los años ochenta se tuvo la certeza de que el mundo había llegado a un estadio en que las decisiones económicas de los actores globales –tanto privados como públicos– obedecerían simplemente a un cálculo de costos y, finalmente, podrían dejar de lado cualquier consideración geopolítica. En un mundo unipolar, que pensamos sería eterno, la producción de una infinidad de bienes se convirtió en un proceso multinacional donde la estructura de costos definía cuál era el lugar ideal para cada fase del proceso de producción. Por un tiempo pensamos que así sería por siempre.

Sin embargo, una serie de fenómenos estructurales y coyunturales han cambiado de manera significativa esa situación. Tenemos el ascenso de China como competidor no sólo comercial, sino sobre todo tecnológico de Estados Unidos, junto con los efectos que la pandemia de 2020 tuvo tanto en el corto como largo plazo, y la invasión rusa a Ucrania, eventos todos que han puesto en cuestión la idea de que sólo los costos importan en las decisiones de dónde ubicar procesos productivos particulares. De pronto se impuso una nueva realidad en que la certidumbre



política y la resiliencia frente a pandemias o guerras se volvieron una necesidad y un criterio más a tomar en cuenta en las decisiones de localización. Muchas empresas privadas han empezado a relocalizar sus procesos productivos, priorizando la certidumbre sobre los costos. A este cambio estructural en las cadenas globales de valor se le llama *nearshoring*.

Lejos de ser una novedad, conceptos como éste ya se discutían en la literatura hace décadas, como lo muestra el trabajo de Carmel y Tjia (2005). Además, es importante destacar que el *nearshoring* es sólo una de las múltiples estrategias de externalización mencionadas en investigaciones como el artículo de Nicholson *et al.* (2018). Sin embargo, lo que ha cambiado en el panorama actual, específicamente en 2023, es que esta estrategia ha cobrado mayor relevancia. Si bien son múltiples factores los que influyeron en este importante cambio en la dinámica económica global, fue sin duda la pandemia lo que terminó por dejar en claro que las prioridades necesitaban cambiar. La pandemia de COVID-19

actuó como un catalizador, haciendo evidente la fragilidad de las cadenas de suministro globalizadas y exponiendo la necesidad de una mayor resiliencia y agilidad en la producción y la logística. Este escenario llevó a las empresas a reconsiderar la externalización a larga distancia, favoreciendo el *nearshoring* como una estrategia más segura. La urgencia de minimizar riesgos y garantizar la continuidad de las operaciones en un entorno volátil aceleró la adopción de este modelo industrial. Las empresas, al enfrentarse a interrupciones imprevistas y a la creciente incertidumbre, comenzaron a valorar la proximidad geográfica y la estabilidad política como factores clave para mantener la integridad de sus cadenas de suministro. Así, lo que antes era una tendencia emergente se convirtió en una práctica claramente definida y ampliamente adoptada, marcando un antes y un después en la dinámica económica mundial pospandemia.

Para México este cambio crucial en la lógica de las decisiones empresariales globales resulta signifi-



cativo y puede traer beneficios importantes al país, pues significa que las grandes empresas globales interesadas en el mercado de Estados Unidos –que sigue siendo el más grande del mundo– están priorizando la certidumbre sobre los bajos costos; es decir, están prefiriendo localizar al menos parte de sus procesos productivos en América Latina en lugar de en Asia, y de manera más concreta en México en lugar de en China.

Hay varios factores que explican el potencial de México para atraer actividad económica en este contexto. A diferencia de otros países latinoamericanos, México ha desarrollado una base manufacturera avanzada y una economía diversificada, elementos clave para una transición efectiva hacia nuevas actividades económicas. Este potencial se ve reforzado por el acceso del país a múltiples mercados internacionales a través de su red de tratados de libre comercio. El Banco Interamericano de Desarrollo subraya este punto, pronosticando un aumento sustancial en las exportaciones mexicanas debido al

proceso de relocalización, mientras que iniciativas como el Chips and Science Act¹ en Estados Unidos presentan nuevas oportunidades para fortalecer la posición económica de México.

Los impactos del *nearshoring* ya son una realidad tangible, aunque nos enfrentamos a la limitación de no disponer de herramientas estadísticas precisas para cuantificar su magnitud en la industria y economía mexicanas. No obstante, contamos con indicadores que ofrecen una visión parcial de este fenómeno: el aumento notable en la demanda de espacios en parques industriales, niveles récord de inversión extranjera directa (IED) y un crecimiento significativo en las exportaciones mexicanas en el periodo pospandemia. Sin embargo, estos datos no proporcionan una medida exacta. Por ejemplo, tanto las exportaciones como la IED son indicadores limitados. Es posible que operaciones de *nearshoring* se financien internamente, y no todas las actividades que generan IED están vinculadas a este fenómeno. Respecto a las exportaciones, no ofrecen una imagen completa, ya que el *nearshoring* podría estar impulsando la sustitución de importaciones de insumos, aumentando el contenido nacional de nuestras exportaciones sin alterar significativamente el volumen total exportado.

A pesar de estas limitaciones, podemos realizar una inferencia lógica basándonos en los patrones observados: si la actividad industrial ha aumentado la demanda en parques industriales, si la IED ha crecido y nuestras exportaciones hacia Estados Unidos han experimentado un incremento notable en un contexto donde las empresas globales buscan acercar su producción a Estados Unidos y el gobierno estadounidense ha adoptado una política industrial agresiva, es razonable concluir que el *nearshoring* está ejerciendo un efecto significativo en México. Ante esta evidencia circunstancial pero difícil de ignorar, ¿qué debería hacer México? La respuesta puede encontrarse en nuestra propia historia económica, la

¹ Se refiere a una iniciativa del Presidente Biden, aprobada por el congreso de los Estados Unidos, que con una inversión de 280 mil millones de dólares pretende impulsar el desarrollo tecnológico y manufacturero para hacer a Estados Unidos menos dependiente de las manufacturas asiáticas.

cual nos enseña a ser cautelosos con el auge y las consecuencias de un crecimiento rápido.

La historia económica de México ofrece lecciones valiosas, especialmente al considerar el auge posterior al Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). Aunque este tratado trajo un notable crecimiento económico y desarrollo manufacturero, no estuvo exento de desafíos. El país experimentó un deterioro ambiental significativo, un aumento en la desigualdad, especialmente en términos regionales, y el desplazamiento de industrias locales. Estos efectos subrayan la importancia de un enfoque equilibrado, que no sólo busque el crecimiento económico, sino también atienda a la sostenibilidad y equidad. El TLCAN posicionó a México en un inicio como un actor clave en la manufactura global, atrayendo inversiones extranjeras masivas. Sin embargo, este crecimiento no fue uniformemente benéfico: mientras algunas regiones y sectores se enriquecieron, otros quedaron rezagados, ampliando la brecha de desigualdad. Además, la falta de políticas de sostenibilidad llevó a un impacto ambiental adverso, planteando cuestiones críticas sobre el costo real del desarrollo económico.

Este patrón de crecimiento desigual y los desafíos que conlleva se hicieron más evidentes con la entrada de China a la Organización Mundial de Comercio (OMC) en 2001. Este acontecimiento demostró la naturaleza efímera del *boom* económico pos-TLCAN y la vulnerabilidad del proyecto de integración de Norteamérica. La competitividad de México se vio desafiada, resaltando la necesidad de no depender únicamente de circunstancias externas favorables. Este evento histórico sirve como recordatorio crucial de la importancia de construir una economía resiliente y diversificada, capaz de adaptarse a los cambios globales. Un error fundamental en ese entonces fue la ausencia de una política industrial en México; hoy resulta ineludible.

La situación actual del *nearshoring* en México invita a reflexionar sobre estas lecciones históricas. Si bien presenta oportunidades significativas para el crecimiento económico, es esencial abordar de manera proactiva los desafíos inherentes. Esto implica desarrollar políticas públicas que fomenten no sólo la inversión y el crecimiento económico, sino también la sostenibilidad ambiental, la equidad social y el apoyo a las industrias locales. Además, es crucial prepararse para futuros cambios en el panorama económico global, asegurando así un desarrollo sostenible y a largo plazo para México en la era pos-pandemia.

Mientras el *nearshoring* se consolida actualmente como un fenómeno fundamental en la economía global, derivado de la manera en que las empresas estructuran sus cadenas de suministro, debemos estar conscientes de que la única constante en el mundo de hoy es el cambio, y que esta tendencia, al igual que muchas otras en nuestra historia económica, podría evolucionar o incluso dar paso a nuevos paradigmas en respuesta a futuros desarrollos globales.

Sergio Silva Castañeda

Licenciado en Economía por el CIDE, doctor en Historia de América Latina por la Universidad de Harvard. Actualmente es investigador del Banco de México.
srgsilvac@gmail.com

Lecturas recomendadas

Carmel, E. y P. Tjia (2005), *Offshoring Information Technology: Sourcing and Outsourcing to a Global Workforce*, Cambridge, Cambridge University Press.
Nicholson, B., S. Sahay y R. Heeks (2018), "Global sourcing and development: New drivers, models, and impacts", *Information Systems Journal*, 28(3): 532-537.



Agua, desigualdad y medio ambiente en México:

reflexiones desde la UAM Xochimilco sobre un problema creciente

Asistimos a una crisis global del agua con consecuencias sociales y económicas que se han vuelto uno de los problemas acuciantes del mundo en este siglo. Es pertinente, por tanto, preguntarse cómo ha de enfrentarse en México. Por ello, la División de Ciencias Sociales y Humanidades de la UAM Xochimilco ha reunido a un grupo de profesores y profesoras que, en un diálogo transdisciplinario, buscan aportar para un entendimiento integral del problema del agua y su relación con el bienestar social y ambiental.

Introducción

A nivel global, la crisis del agua y sus impactos en la vida de las personas son ya una condición innegable. Los crecientes conflictos sociales por el agua, acompañados por las consecuencias económicas y sociales de los largos periodos de sequías y de inundaciones por fenómenos meteorológicos extremos, como los huracanes y tormentas tropicales, son ya parte de las preocupaciones centrales de los gobiernos en el siglo XXI.

Aunado a esta crisis, el mundo experimenta un fenómeno de crecimiento acelerado de la población que habita en ciudades, conocido como hiperurbanización. Este fenómeno nos confronta como sociedad a retos de magnitud hasta ahora incierta. La sostenibilidad de los modos de vida, la gestión de espacios habitables y la generación de condiciones de vida dignas para las personas en todo el mundo, son algunas de las preocupaciones centrales para los gobiernos y la sociedad.

Todos estos cambios están ocurriendo a distintas velocidades, con intensidades y expresiones diferenciadas en el territorio. Esto es así no sólo por la diversidad de la geografía global y la variabilidad climática y ecológica, sino porque dichos cambios dependen de factores como la riqueza y desarrollo de los países, las características de sus sistemas de protección de derechos sociales, de sus formas

de distribución del bienestar entre la población y de sus patrones de consumo de recursos de todo tipo, que están socialmente determinados.

En condiciones como éstas, es pertinente preguntarnos cómo enfrentaremos en México estos cambios en relación con la magnitud de los problemas relacionados con el agua. De manera particular, cómo podemos garantizar un acceso al agua más seguro y equitativo en un país desigual en términos sociales y territorialmente diverso. En la División de Ciencias Sociales y Humanidades de la UAM Xochimilco, hemos reunido a un grupo de profesores y profesoras que, desde sus diferentes perspectivas de investigación, proponen un diálogo transdisciplinario para tener un entendimiento más integral del problema del agua y su relación con el bienestar social y ambiental, en condiciones de desigualdad. Esperamos generar con estas reflexiones el interés y la participación de la sociedad en el seguimiento de las acciones gubernamentales, sociales y privadas que puedan incidir para detener el agravamiento y lograr una mejora de la gestión del agua en nuestro país.

■ **Territorios de la diversidad: entre sociedades y naturalezas**

■ En la actualidad, dos conceptos guían la gestión de los recursos naturales: el desarrollo y la sostenibilidad. El primero alude a una mejora hacia el futuro e implica crecimiento económico, bienestar social, conocimiento científico, tecnología y sustentabilidad. Sin embargo, en nombre del desarrollo se han materializado grandes proyectos inmobiliarios, obras de infraestructura, destinos turísticos y concesiones para la extracción de minerales, aprovechamiento de energías renovables y uso de la biodiversidad en todas sus escalas, acciones que tienen un fuerte impacto territorial y que se entrelazan con problemas como la escasez, el despojo territorial, desastres, desplazamientos de población y violencia.

La sustentabilidad se ha definido como el uso racional de los recursos naturales sin comprometer la posibilidad de que las generaciones futuras satisfagan sus propias necesidades. Aparentemente, se trata de un mandato simple, claro y directo; sin embargo, el asunto es complejo y de difícil gestión. Si reconoce-



mos la gran diversidad poblacional existente en el planeta, cabe preguntarse qué debemos entender por dichas necesidades. El discurso pareciera asumir una homogeneidad en la población en tanto seres humanos; sin embargo, si consideramos la diversidad de lugares, de grupos sociales, condiciones económicas, conocimientos, creencias, tradiciones, sus prácticas cotidianas, sus valores y sus formas de organización, resulta complicado definir lo que se entiende por “necesidades”. Además, está la ambigüedad sobre qué queremos decir con “generaciones futuras”, pues resulta que la mayor parte de los actuales habitantes del planeta no habían nacido cuando se estableció ese principio en la década de los años ochenta.

Si vamos más a fondo, cabe incluso cuestionar qué entendemos por “la naturaleza y sus procesos”. Generalmente pensamos que los elementos de los fenómenos climáticos, hídricos, biológicos, geológicos y geomorfológicos de la superficie terrestre responden únicamente a leyes universales de la física y la biología, pero lo cierto es que el ser humano desempeña un papel fundamental en las dinámicas de cambio en la biósfera. Por otra parte, las características sociales, económicas y políticas producen regiones con un desarrollo geográfico desigual. Además, solemos dar más valor a la preservación de la biodiversidad que a la gestión de otros elementos que resultan esenciales para la vida sobre el planeta, como es el caso de la provisión de agua dulce y la regulación hidrológica.

En síntesis, sociedad y naturaleza no son dos esferas de la vida independientes, así como no existe una sola naturaleza, sino una multiplicidad de naturalezas que responden a la diversidad social, en el marco de contextos temporales y geográficos específicos que producen una gran diversidad de territorios.

Servicios ecosistémicos y seguridad hídrica

Para que tanto los individuos como las sociedades incidan en los procesos de reproducción social en los sistemas socioecológicos y puedan satisfacer sus necesidades básicas, fundamentales e intermedias, es imperativo que los ecosistemas naturales o transformados mantengan un nivel aceptable de integridad

ecológica y con ello sea posible la provisión de bienes y servicios que abonen al bienestar social.

Los “servicios ecosistémicos” –también llamados “contribuciones de la naturaleza a las personas”– se entienden como todas aquellas aportaciones o beneficios que la humanidad recibe de la naturaleza en forma de bienes o servicios. De acuerdo con la clasificación propuesta por la Agencia Ambiental Europea, los servicios ecosistémicos se clasifican en tres categorías en función de su aporte: producción, regulación-mantenimiento y culturales.

En toda la biósfera, los ecosistemas están siendo alterados por impulsores de cambios naturales y antrópicos, entendidos como factores externos que afectan de manera directa o indirecta la estructura y función de los ecosistemas, ocasionando su degradación y afectaciones al bienestar social. Los impulsores de cambios naturales son todos aquellos factores biofísicos que determinan parte de la dinámica de la biósfera, están fuera del control de los seres humanos y comprenden los fenómenos geológicos, hidrometeorológicos y biológicos del planeta.

Los impulsores de cambios antrópicos son aquellos inducidos por el hombre y que están asociados a los modelos de desarrollo económico. Los de tipo directo corresponden a actividades que inciden de manera inmediata en la biomasa o en los procesos ecológicos de los ecosistemas: la deforestación, la contaminación del suelo, agua y aire, o el tráfico ilegal de la vida silvestre, entre otros. Los impulsores indirectos son resultado de causas subyacentes que se sustentan en valores, intereses y comportamientos sociales; por ejemplo, el cambio de uso del suelo, el crecimiento demográfico, los patrones de consumo insostenibles, la racionalidad económica que demanda mayor energía y materiales, el impulso a la tecnología para hacer más eficiente la transformación de la naturaleza, las enfermedades infecciosas emergentes de carácter pandémico y los conflictos socioambientales relacionados con la inequidad en la distribución y uso de los recursos naturales.

Lograr que cada persona cuente con agua segura es un complejo desafío para los sistemas socioecológicos, pues implica garantizar el movimiento natural del agua entre la atmósfera y la superficie

terrestre mediante, por un lado, la preservación de los patrones de precipitación, infiltración y recarga de acuíferos y, por otro lado, el mantenimiento de la escorrentía superficial y subterránea, así como el cuidado de los procesos de evapotranspiración por la vegetación. El reto es asegurar que los ecosistemas provean de agua renovable a la sociedad ante la condición de escasez generalizada en el planeta debido al calentamiento global, la intensificación de las condiciones de sequía, la modificación de los regímenes de la precipitación en magnitud, duración y estacionalidad, la creciente extracción de aguas subterráneas para la producción de alimentos y mantenimiento de las ciudades, y el rápido crecimiento poblacional en áreas urbanas y periurbanas, el cual demanda mayor consumo de agua potable y genera, a su vez, grandes volúmenes de aguas residuales que no se tratan, reciclan y reutilizan a cabalidad.

México es un país con fuertes contrastes en cuanto al acceso al agua, condición que se manifiesta de forma diferencial en el territorio, pues hay regiones que se caracterizan por largos periodos de sequías extremas o severas, los cuales se agudizan por factores como: la escasez de agua asociada a la disminución notable en los niveles de almacenamiento de presas y embalses por falta de lluvias e incremento de olas de calor; problemas de desabasto, tandeo, aumento de precios en el abasto de agua a la población; concesiones de agua preferenciales a grupos de poder; incremento en la contaminación de manantiales, ríos superficiales y subterráneos, lagos, lagunas, acuíferos y embalses por la concentración de desechos sólidos, microplásticos y vertido de aguas residuales urbanas, industriales y del sector agropecuario. En tanto que en otras regiones la crisis hídrica se manifiesta como excesos en la concentración de caudales de agua debido a la disminución en los periodos de rotación de peligros hidrometeorológicos, cuya magnitud y severidad incrementan los niveles de riesgo e impactos tanto en la seguridad física y patrimonial de las personas como en la rentabilidad de actividades productivas, de manufactura y servicios.

Así pues, el desafío en nuestro país implica la conciliación y gestión eficiente y equitativa de los recursos hídricos desde una perspectiva territorial,



en donde se armonicen y satisfagan las necesidades de la población y sus actividades socioeconómicas con el compromiso de preservar el caudal ecológico que requieren los ecosistemas naturales para asegurar su funcionamiento, en particular el ciclo del agua. Esto implica: impulsar medidas para proteger y preservar suelos, bosques, lagos, ríos y humedales; mejorar la eficacia en la gestión del agua en cuanto a los usos que se le da a ésta para determinadas actividades; implementar estrategias para maximizar la captación, tratamiento, reciclaje y reúso del agua, así como promover prácticas sostenibles que garanticen una producción, suministro y distribución confiables y seguros del agua a largo plazo.

Existe un concepto que da cuenta de manera sintética de estos retos: *seguridad hídrica*. Este concepto fue acuñado en el año 2000 durante el II Foro

Mundial del Agua, en La Haya, Holanda, y se refiere a la capacidad de una comunidad, región o país para garantizar un acceso equitativo, efectivo y seguro de agua, en cantidad y calidad, para el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, sin comprometer ni el funcionamiento ni la salud de los ecosistemas naturales.

■ Seguridad hídrica y acceso al agua

■ La seguridad hídrica tiene que ver con la certidumbre de que como sociedad podamos contar con el agua requerida, en cantidad y calidad, para satisfacer las diferentes necesidades relacionadas con el líquido vital. Algunas de estas necesidades son: mantener las condiciones ambientales necesarias para preservar los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, el uso personal y doméstico, la producción de alimentos, la generación de bienes de consumo y de energía, entre otras.

Tener seguridad hídrica implica garantizar que nuestras cuencas –que son las unidades naturales en las que se lleva a cabo el ciclo del agua en el territorio– posean las condiciones necesarias para seguir captando, transportando y concentrando el agua. Por otro lado, la seguridad hídrica también tiene que ver con la capacidad de las sociedades humanas de gestionar los impactos de las sequías y las inundaciones. En suma, la seguridad hídrica estará determinada por los mecanismos con los que contemos como sociedad para proteger y garantizar las condiciones ambientales e infraestructurales en las que accedemos y usamos el agua, de modo tal que podamos tener salud, así como un desarrollo social y económico.

Ahora bien, ¿qué elementos ponen en riesgo la seguridad hídrica de una población? Actualmente, el cambio climático y la contaminación se conjugarán con factores poblacionales como el crecimiento y concentración de la población en ciudades; factores económicos, que tienen que ver con los patrones de localización y las dinámicas productivas de las diferentes actividades socioeconómicas; factores geográficos, relacionados con las vocaciones naturales de los territorios, y factores sociales, relacionados con las condiciones diferenciadas de acceso y

consumo del agua por parte de los grupos sociales asentados en diferentes regiones. Y es la conjunción de estos factores lo que impone hoy día importantes retos a los gobiernos y a la sociedad para garantizar la seguridad hídrica en nuestro país.

Los distintos procesos de deterioro ambiental, el impacto negativo de las actividades humanas y económicas en la calidad del agua, la falta de sistemas de tratamiento efectivo, la intensificación de fenómenos naturales extremos (como sequías e inundaciones) y la mala planeación del uso del territorio, combinados con las desigualdades sociales y la incidencia de la pobreza en México, permiten observar que actualmente la seguridad hídrica en México está en riesgo.

La buena noticia es que la seguridad hídrica es una capacidad que se puede desarrollar. Para asegurarla son necesarias acciones en distintos ámbitos. El primero tiene que ver con recuperar y proteger la



capacidad de provisión de nuestras cuencas; es decir, con la recuperación del equilibrio ecohidrológico de los sistemas que proveen de agua a nuestro entorno. El segundo está relacionado con el desarrollo de capacidades de adaptación al cambio climático, en aras de gestionar el riesgo asociado a fenómenos hidrometeorológicos extremos y disminuir la vulnerabilidad de la población y de los territorios. El último ámbito que requiere nuestra acción tiene que ver con las condiciones en las que como sociedad hemos de construir un sistema de gobernanza del agua que no reproduzca la desigualdad entre las personas y que ponga en el centro el carácter inalienable del derecho al agua en condiciones de accesibilidad, disponibilidad y calidad, para la satisfacción de las necesidades básicas.

La agenda en cada uno de estos ámbitos implica concebir orientaciones políticas fundamentales que vayan desde el nivel de urgencia y prioridad que tienen los temas ambientales en la agenda gubernamental, hasta el diseño institucional de las estructuras burocrático-administrativas que gestionan las políticas de producción y provisión de los bienes y servicios de agua y saneamiento, pasando por los montos de inversión necesarios y la definición de acciones programáticas pertinentes para asegurar la accesibilidad, disponibilidad y calidad del agua en la vida de las personas.

Para tomar decisiones que promuevan la progresividad de las acciones en el sentido buscado en cada uno de estos ámbitos, es necesario contar con mecanismos de evaluación y monitoreo que den cuenta del estado del problema y la pertinencia de las acciones que llevamos a cabo, pero también de las diferencias en las condiciones de vida que hay en México y la manera en la que éstas se expresan cuando se analizan los datos que permiten conocer cómo se lleva a cabo el acceso al agua en las diferentes regiones.

■ La desigualdad socioterritorial y la estructura de las carencias en México

■ Como notara Humboldt en su famoso *Ensayo político sobre la Nueva España*, “México es el país de la desigualdad. Acaso en ninguna parte la hay más

espantosa en la distribución de fortunas, civilización, cultivo de la tierra y población”. Casi dos siglos después de dicha observación, México es un país de ingreso medio con gran potencial económico, pero sigue siendo el país de la desigualdad y la pobreza. De acuerdo con la medición multidimensional de la pobreza que realiza el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval), en 2022 había 46.8 millones de personas en situación de pobreza (36.3% de la población), 9.1 millones en situación de pobreza extrema (7.1% de la población), y 15.5 millones de personas con ingresos menores a la línea de ingreso de pobreza extrema.

La medición multidimensional de la pobreza que tenemos en México toma también en cuenta seis indicadores de carencias sociales (falta de acceso a los derechos sociales consagrados en la Constitución). De acuerdo con la última medición: cerca de uno de cada cinco mexicanos tiene rezago educativo, cuatro de cada 10 carecen de servicios de salud, sólo la mitad cuenta con seguridad social, 17.8% tienen viviendas sin servicios básicos, 9.1% presenta carencias por calidad y espacio en la vivienda y 18.2% carece de alimentación nutritiva y de calidad. En esta última medición, destaca el aumento de las carencias promedio de los mexicanos y el aumento de la pobreza extrema, a pesar de la reducción de la pobreza respecto a 2020. Más allá de las pequeñas variaciones observadas en el periodo 2016-2022, las constantes siguen siendo la desigualdad y la pobreza que tanto impresionaron a Humboldt.

En términos de entidades federativas, los estados en los que la mayoría de la población es pobre son siempre los mismos: Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala y Veracruz, y algo similar ocurre con los municipios. De acuerdo con la medición más recientes, de 2020, los 629 municipios en los que ocho de cada 10 personas se encuentran en situación de pobreza se encuentran en: Oaxaca, Puebla, Chiapas y Veracruz, y tienden a ubicarse en lugares montañosos en los que el acceso a servicios básicos e infraestructura carretera es muy bajo. El Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), que supuso una gran transformación de la economía del país, ha dejado prácticamente inalterada la enorme

brecha de desarrollo social entre el norte y el sur del país. Sin importar qué indicadores se usen, el solo hecho de nacer en una región u otra del país representa oportunidades dramáticamente dispares para las personas.

En la medida en que dichas mediciones se basan en encuestas a hogares —como la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH, realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía cada dos años)—, son aproximaciones indirectas a lo que puede haber detrás de dichas carencias y bajos ingresos desde una perspectiva territorial y comunitaria. Las características territoriales afectan a la comunidad y éstas, a su vez, afectan los patrones de desarrollo, los que son afectados igualmente por las intervenciones públicas que buscan promover el desarrollo. En esa dialéctica de transformación parece estar ganando la inercia (*path dependency*). Por ejemplo, es posible identificar zonas de muy baja productividad de cultivos y bajos ingresos que están asociadas a estrés hídrico sistémico y condiciones topográficas adversas para la producción y el consumo, así como zonas que sufren discontinuidad económica y afectación de cultivos por la razón opuesta, las inundaciones. De igual forma, sabemos, por ejemplo, que en un país con tremendas carencias de vivienda y de servicios en ellas, se presenta un fenómeno significativo de abandono de las mismas porque la oferta de vivienda social se ha desarrollado en espacios desconectados de polos económicos, sin acceso a servicios de salud, educación, transporte y, en consecuencia, con serios problemas de inseguridad.

La desigualdad, la pobreza y la estructura de las carencias en México son, desafortunadamente, una constante, a pesar de décadas de esfuerzo gubernamental, modernización económica y la expansión relativa de los servicios de salud y educación para la población. Por ésta y otras razones poderosas, como el desafío del cambio climático y las nuevas formas de vulnerabilidad que conlleva, es necesario poner más atención al territorio y a las variables medioambientales de las que depende, en última instancia, la posibilidad del desarrollo sostenible y la seguridad humana.

■ **Acceso y disponibilidad del agua para consumo humano en México: diferencias por entidad federativa**

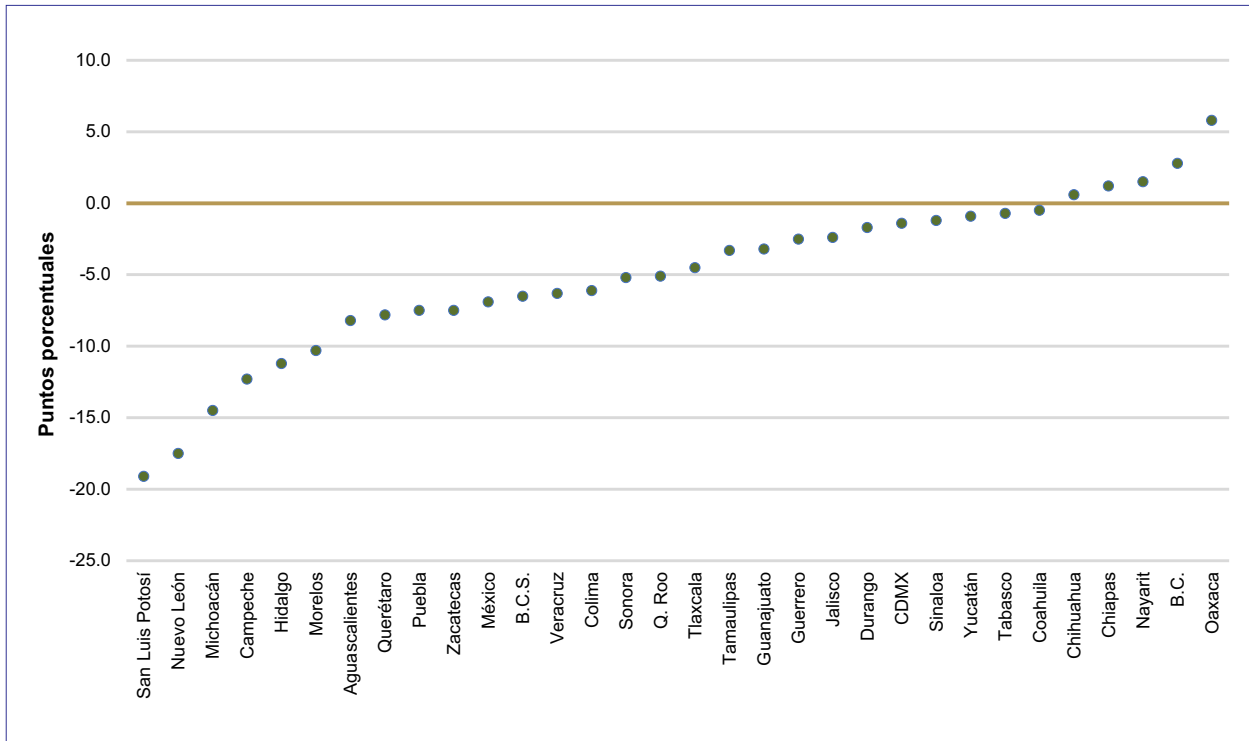
■ México es un país de contrastes marcados. Las diferencias en el acceso a recursos naturales por parte de distintos grupos son la expresión de relaciones estructuralmente disímiles entre clases, grupos étnicos, géneros y generaciones. El agua para consumo humano no escapa a esta condición.

El acceso al agua y su disponibilidad son aspectos en los que las desigualdades sociales pueden observarse con claridad en nuestro país. La creciente y acelerada escasez del vital líquido da cuenta de cómo hay territorios en donde, a pesar de sequías o lapsos prolongados de desabasto, hay quienes no pierden el acceso continuo al agua; en tanto que, por el contrario, hay regiones en las que pese a ser ricas en este recurso, acceder a ella es caro por falta de infraestructura.

En el tema del acceso al agua hay que hablar de una dimensión física y otra económica. La primera puede caracterizarse en términos de abastecimiento o de conexiones domésticas, entre otras; la segunda alude a la capacidad de los hogares para cubrir costos asociados con los servicios de agua. Cabe, entonces, preguntarse cuáles son algunas de las desigualdades en el acceso al agua por entidad federativa en México.

Los estados con la menor proporción de población con suministro diario de agua eran Morelos y Baja California Sur en 2022, ambas por debajo de 25 por ciento. Sin embargo, en comparación con 2016, ocurrió un agravamiento generalizado en 2022: en 27 estados disminuyó la proporción de quienes tenían agua diariamente. El panorama lucía más grave en San Luis Potosí, Nuevo León, Michoacán, Campeche, Hidalgo y Morelos, donde las reducciones fueron de más de diez puntos porcentuales (véase la Gráfica 1).

Uno de los indicadores de la suficiencia de agua es la cantidad disponible en litros por persona al día (se requieren de 50 a 120 litros diarios para satisfacer las necesidades básicas de una persona). En 2020, las entidades con la menor suficiencia eran Oaxaca, Hidalgo, Chiapas, Puebla, Tlaxcala y Guanajuato, situación paradójica, pues algunos de estos estados cuentan con amplia disponibilidad de recursos na-



Gráfica 1. Cambio en puntos porcentuales en el suministro diario de agua por entidad federativa en México (2016-2022). Fuente: elaboración propia con base en datos de la ENIGH, 2016-2022.

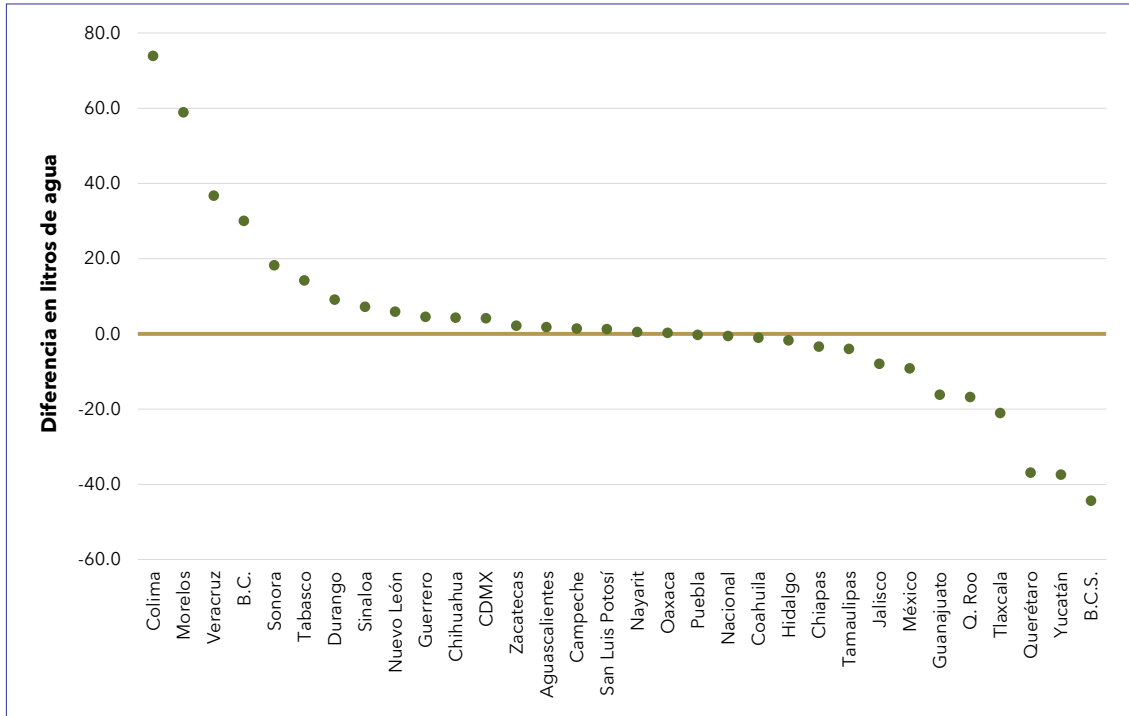
turales. Además, hay 11 entidades con pérdida de disponibilidad entre 2018 y 2020, entre ellas: Hidalgo, Chiapas, Tlaxcala y Guanajuato están en la situación más crítica, pues tienen tanto pocos litros de agua por habitante como reducciones en su disponibilidad (véase la Gráfica 2).

El siguiente punto es la variación del costo del agua en el país. La tarifa de agua potable para consumo doméstico en 2021 (considerando el costo por metro cúbico en consumo de 30 m³ por mes) era más cara en León, Querétaro y Pachuca, donde superaba los 30 pesos por metro cúbico al mes. Al considerar el cambio entre 2016 y 2021, llama la atención que, por un lado, en 39 de 40 ciudades hubo incremento en el costo del agua; por otro lado, hay dos ciudades en las que el costo aumentó en mayor magnitud que en el resto: Delicias y Chihuahua, Chihuahua, con incrementos de 14 y 13 pesos, respectivamente, seguidas por León y Querétaro, con un aumento de 8 pesos (véase la Gráfica 3).

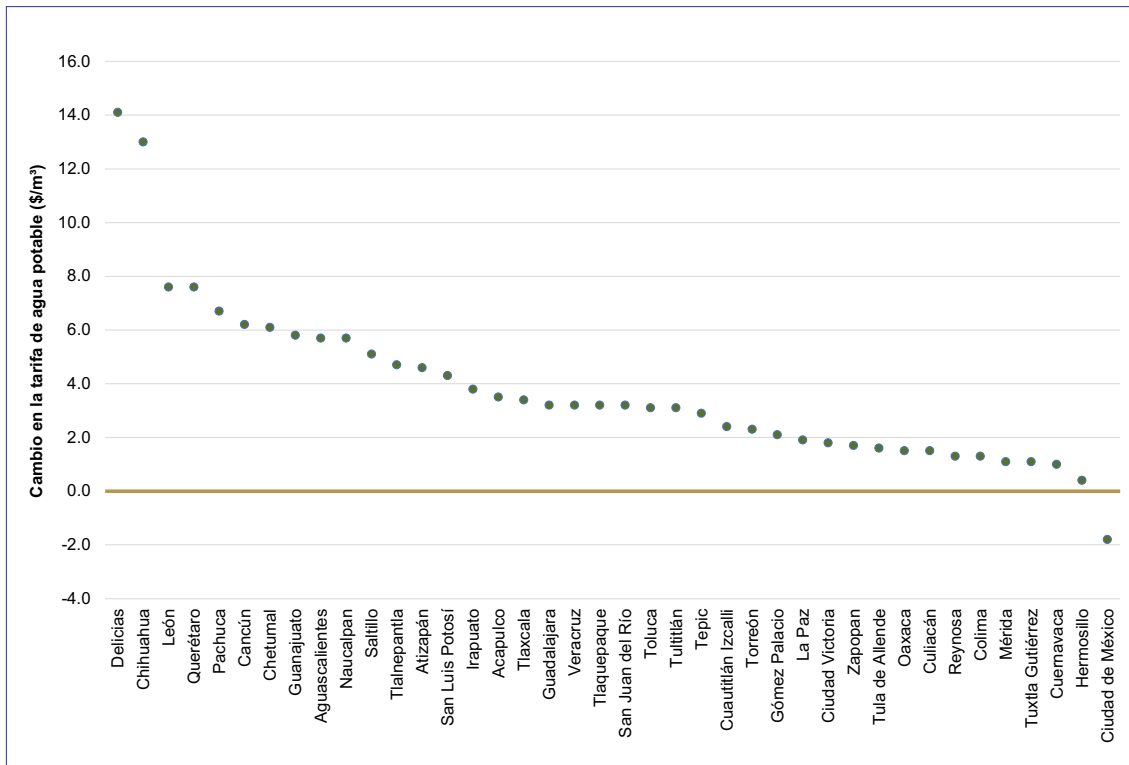
La tarifa para el agua de pipa de diez mil litros tenía un costo promedio notablemente mayor en

Monterrey (\$3 074 pesos) que en el resto de las 12 ciudades monitoreadas; además, esta ciudad era la que había registrado el encarecimiento más pronunciado entre el segundo trimestre de 2020 y el primero de 2023 (\$1 489 pesos más cara) (véase la Gráfica 4).

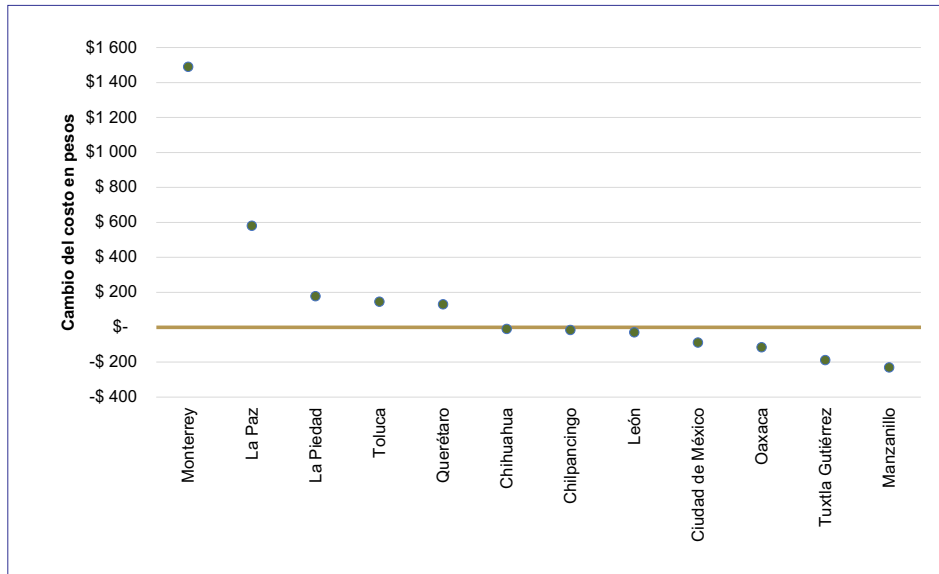
En conclusión, el acceso y la disponibilidad del agua para consumo humano, en las dimensiones examinadas, parecería tener su situación más grave en unas pocas entidades y ciudades. Hidalgo es uno de los estados en situación crítica: su proporción de suministro diario de agua es el menor del país, cuenta con pocos litros disponibles por persona al día y es el estado que perdió mayor disponibilidad en el lapso examinado; a esto hay que agregar que Pachuca es una de las ciudades donde la tarifa de agua potable para consumo doméstico es más cara. Dos entidades del Bajío también están en situación complicada: en Guanajuato y Querétaro hay condiciones de poca disponibilidad por persona al día, hubo una reducción entre 2018 y 2020, el agua potable para consumo doméstico es cara y ha



Gráfica 2. Litros de agua suministrada al día por habitante para consumo humano. Cambio en puntos porcentuales por entidad federativa y a nivel nacional (2018-2020). Fuente: elaboración propia con base en datos del Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.



Gráfica 3. Tarifas de agua potable para consumo doméstico (\$/m³ en consumo de 30 m³/mes). Cambio en \$/m³ en ciudades seleccionadas (2016-2021). Fuente: elaboración propia con base en datos de Conagua/Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento/ Gerencia de Programas Federales de Agua Potable y Saneamiento.



Gráfica 4. Cambio en el costo de la tarifa establecida para el acceso al agua de pipa en ciudades seleccionadas. Comparación del segundo trimestre de 2020 con el primer trimestre de 2023. Fuente: elaboración propia con base en datos de Profeco. Quién es Quién en los Precios: Pipas de agua 2021, 2022 y 2023.

habido un aumento en el costo del agua de pipa. Por último, Nuevo León es otra entidad con situación difícil. El agua de pipa se ha encarecido de manera pronunciada en Monterrey, pero también hay una proporción relevante de población en el estado sin suministro diario de agua.

Liliana López Levi

UAM Xochimilco
llopez@correo.xoc.uam.mx

Gilberto Sven Binnquist Cervantes

UAM Xochimilco
gsven@correo.xoc.uam.mx

Esthela Irene Sotelo Núñez

UAM Xochimilco
esotelo@correo.xoc.uam.mx

Claudia Maldonado Trujillo

UAM Xochimilco
cmaldonado@correo.xoc.uam.mx

Manuel Triano Enríquez

UAM Xochimilco
mtriano@correo.xoc.uam.mx

La sección “Territorios de la diversidad: entre sociedades y naturalezas” fue escrita por la doctora Liliana López Levi; el apartado “Servicios ecosistémicos y seguridad hídrica” es una aportación del maestro Gilberto Sven Binnquist Cervantes; “Seguridad hídrica y acceso al agua” es un texto de la doctora Esthela Irene Sotelo Núñez; “La desigualdad socioterritorial y la estructura de las carencias en México” contó con la redacción de la doctora Claudia Maldonado Trujillo, y “Acceso y disponibilidad del agua para consumo humano en México: diferencias por entidad federativa” fue escrito por el doctor Manuel Triano Enríquez, ellas y ellos adscritos a la Universidad Autónoma Metropolitana.

José Eduardo González Reyes

Desde las redes

¡Hasta la vista, influenza!

Por primera vez en la historia, un virus de la influenza parece haber sido erradicado de la población humana. Se trata del linaje Yamagata de la influenza tipo B.

Este resultado no es parte de una estrategia planeada para eliminarlo, sino, en parte, resultado del uso de intervenciones no farmacéuticas durante la pandemia de COVID-19, como quedarse en casa, usar cubrebocas y mejorar la ventilación en espacios cerrados.

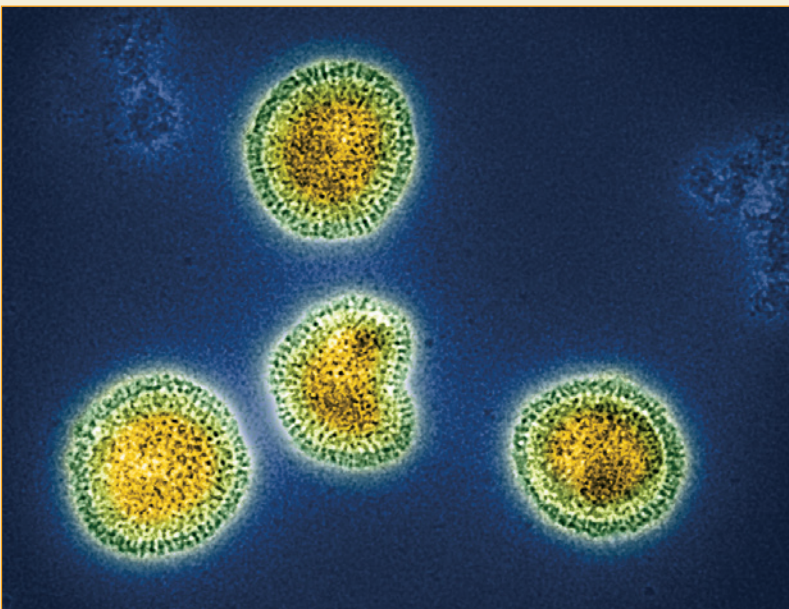
Varias vacunas —como la tetravalente recién aprobada en agosto de 2023 por la Cofepris— usan la variante Yamagata, junto con otras variantes de la influenza tipo A y B. Sin embargo, el 23 de septiem-

bre de 2023, la Organización Mundial de la Salud recomendó ya no incluir esta cepa en las formulaciones. La decisión se sustenta en el hecho de que antes de la pandemia se había observado una disminución de los casos con Yamagata, y desde marzo de 2020 no se ha secuenciado este virus de las muestras de personas enfermas.

Aunque la recomendación es reciente, la eliminación de la cepa es una discusión que ha estado abierta desde hace más de cuatro años, por lo que en Estados Unidos, para la temporada de influenza 2024-2025, se usarán vacunas con sólo tres y no cuatro variantes como se hacía hasta hace poco.

¿Por qué es necesario dejar de usar Yamagata en lugar de vacunarnos contra ella “por si las dudas”? Debido a que para producir algunas vacunas se deben cultivar los virus que posteriormente serán atenuados. Cultivarlos implica que puedan escapar del laboratorio y reintroducirse en la población, un riesgo potencial que podríamos evitar. Además, algunos investigadores señalan que no incluir este virus liberaría capacidad de producción de vacunas que podría usarse para fabricar más dosis y beneficiar a países afectados por la escasez.

La inusitada eliminación de Yamagata nos recuerda el poder de las medidas para evitar infecciones respiratorias que usamos durante la pandemia.



Virus de la influenza B coloreados en amarillo y verde. Crédito: John Gallagher y Audray Harris, Laboratorio de Enfermedades Infecciosas del Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas de Estados Unidos (NIAID).

Más información

Más información: The Lancet (2023), “Influenza vaccine shake-up”, *The Lancet Infectious Diseases*, 23(12). Disponible en: <[https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(23\)00697-7](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(23)00697-7)>.

Cuando los hombros de gigantes se desvanecen

En 2002 Stephen Hawking publicó *A hombros de gigantes*, libro en el que relata los aportes de Copérnico, Galileo, Kepler, Newton y Einstein. El título hace referencia al hecho de que en la ciencia se usa el conocimiento previo para hacer un nuevo progreso intelectual.

Un ejemplo de ello son los artículos de investigación, en los que las afirmaciones se sustentan con hallazgos reportados previamente que el lector puede corroborar en las fuentes originales. Esta tarea se ha facilitado con el internet, pero, ¿qué sucede si estos archivos no se encuentran en la web?

Martin Eve, investigador del Birkbeck College, de la Universidad de Londres, se dio a la tarea de corroborar si siete millones y medio de identificadores de objetos digitales, conocidos como DOI por sus siglas en inglés, tenían su correspondiente archivo en internet.

DOI es un identificador único y permanente para archivos digitales compuesto de números y letras. Proporciona información del objeto digital, como nombre del autor, pero sobre todo permite su localización en la web.

Para el estudio se usó la base de datos de *Cross-Ref*, agencia que emite DOI y que cuenta con más de 20 mil miembros, lo que la posiciona como la más grande a la fecha. Eve generó una muestra que incluyó en promedio 1 000 registros de cada organización miembro.

Los resultados son alarmantes: 28% de estos objetos digitales parecen no haber sido preservados en ningún repositorio digital importante, podrían estar en otras bases de datos e incluso en archivos impresos, pero no pueden ser localizados con su DOI. Por otra

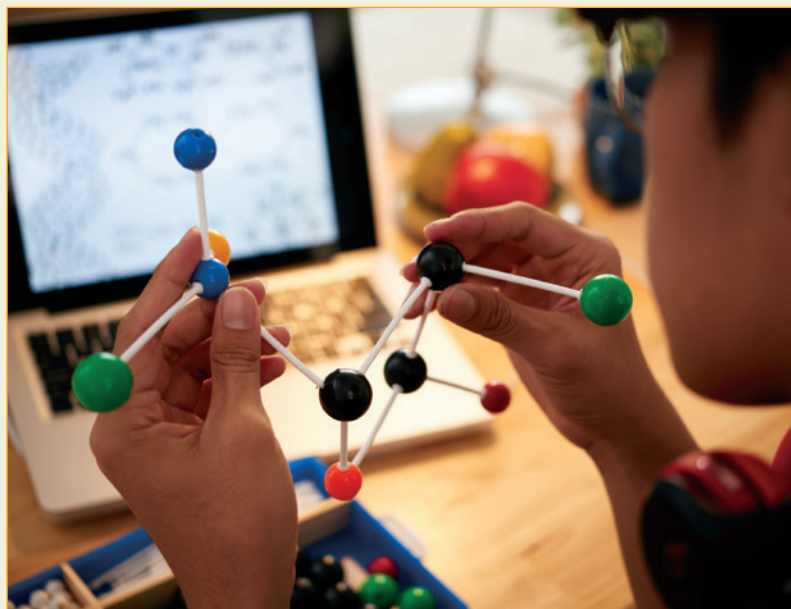
parte, el 58% de los DOI analizados hace referencia a documentos con al menos un archivo en la web.

Existe una falsa suposición de que si un documento cuenta con DOI estará disponible para siempre en internet, pero su permanencia depende de muchos otros factores, como si la editorial o institución tienen la capacidad tecnológica y financiera de preservarlo. Por ejemplo, un estudio de 2021 encontró que más de 170 revistas de acceso abierto habían desaparecido de internet entre el año 2000 y 2019, por lo que los DOI relacionados con estas publicaciones podrían no tener sus correspondientes archivos digitales.

Eve señala en sus conclusiones que el reto de preservación no sólo es técnico, sino que exige cambios sociales y empresariales de parte de las editoriales.

Más información

Más información en: Eve, M. P. (2024), "Digital Scholarly Journals Are Poorly Preserved: A Study of 7 Million Articles", *Journal of Librarianship and Scholarly Communication*. Disponible en: <<https://doi.org/10.31274/jlsc.16288>>.



Las publicaciones científicas son la base de la comunicación entre personas dedicadas a la investigación. Crédito: Freepik.

¿El plástico puede movilizar a tus células?

Cada semana podríamos ingerir aproximadamente 5 gramos de plástico, el equivalente al peso de una tarjeta de crédito.

No quiere decir que comamos pedazos grandes de este material por voluntad propia: micro y nanoplásticos* se cuelean en los alimentos e incluso en el agua que bebemos, provocando que nuestro tracto gastrointestinal esté expuesto constantemente a ellos.

Un estudio realizado en la Universidad de Viena encontró que las partículas de plástico permanecen mucho más tiempo dentro de nuestras células del que se pensaba, incluso pueden pasar a las células hijas durante el proceso de división celular.

Los investigadores encontraron que una vez dentro de la célula, estos plásticos se almacenan en los lisosomas, una especie de estómagos microscópicos que se encargan de reciclar desechos del interior, pero también de destruir estructuras invasoras, como virus o bacterias. Sin embargo, los lisosomas son incapaces de degradar a los micro y nanoplásticos.

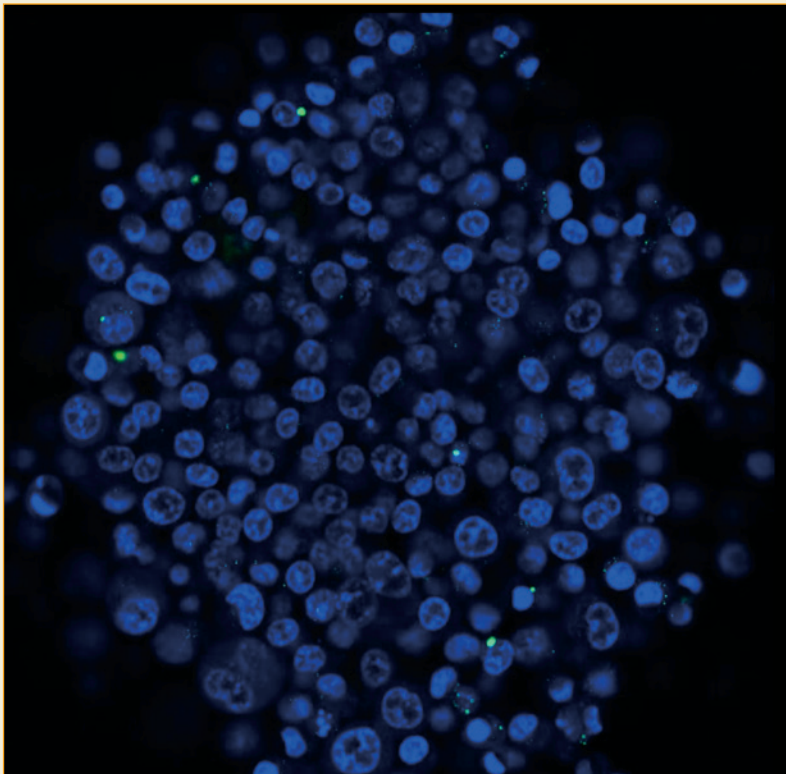
* Hipervínculo: <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/vol-73-numero-2>

El equipo se enfocó en entender el efecto de estos materiales en el curso del cáncer colorrectal. Investigaciones anteriores habían encontrado que mientras más pequeñas son las partículas de plástico es más dañina su interacción con las células. Sus resultados sugieren que partículas plásticas de 0.25 μm aumentan la migración de las células cancerosas a otras partes del cuerpo, lo que podría provocar la aparición de nuevos tumores. Este fenómeno se conoce como metástasis.

La acumulación y persistencia en el interior de nuestras células hace que los micro y nanoplásticos cumplan con dos características que los cataloga como preocupantes de acuerdo con REACH, un manual de sustancias químicas de la Unión Europea.

Más información

Más información: Tao, Y., D. Steckel, J. J. Klemeš *et al.* (2021), "Trend towards virtual and hybrid conferences may be an effective climate change mitigation strategy", *Nat. Commun.* Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27251-2>.



▮ Células tumorales de colon teñidas en color azul; las partículas de plástico aparecen en color verde. Créditos: Chemosphere, 2024.

Noticias de la Academia Mexicana de Ciencias



La AMC dio a conocer a las y los ganadores de los Premios de Investigación 2023

La Academia Mexicana de Ciencias dio a conocer a las y los ganadores de los Premios de Investigación 2023 para científicas(os) jóvenes. Se trata de la distinción más importante que otorga la Academia a investigadores e investigadoras que no han cumplido 40 años, en el caso de los hombres, y 43 años en el de las mujeres.

Desde que se instituyeron en 1961, la Comisión de Premios de la AMC evalúa la investigación de punta y observa criterios como el rigor, la calidad, originalidad e independencia, así como el liderazgo e impacto de los trabajos. A la fecha se han reconocido 252 científicas y científicos de las áreas de ciencias exactas, naturales, sociales, humanidades e ingeniería y tecnología. Asimismo, en 2023 se instituyó una nueva área denominada ciencias médicas y de la salud.

Ganadoras y ganadores de los Premios de Investigación 2023 para científicas(os) jóvenes:

- **Ciencias exactas**
Alma Yolanda Alanís García
Innovación Basada en la Información y el Conocimiento, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías
Universidad de Guadalajara
- **Ciencias naturales**
Adán Oswaldo Guerrero Cárdenas
Laboratorio Nacional de Microscopía Avanzada, Instituto de Biotecnología
Universidad Nacional Autónoma de México
- **Ciencias médicas y de la salud**
Florencia Rosetti Sciutto
Inmunología y Reumatología, Secretaría de Salud
Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición “Salvador Zubirán”
- **Ciencias sociales**
Elisa Ortega Velázquez
Derecho Internacional, Instituto de Investigaciones Jurídicas
Universidad Nacional Autónoma de México

- **Humanidades**
Gabriela García Salido
Centro de Estudios Antropológicos, Facultad de Ciencias Políticas y Sociales
Universidad Nacional Autónoma de México
- **Ingeniería y tecnología**
Grissel Trujillo de Santiago
Departamento de Mecatrónica, Escuela de Ingeniería y Ciencias
Tecnológico de Monterrey

La Academia Mexicana de Ciencias dio a conocer a las y los ganadores de los Premios Weizmann 2023

La AMC dio a conocer a las y los ganadores de los Premios Weizmann 2023. Las tesis doctorales de tres científicas y científicos mexicanos jóvenes fueron merecedoras del reconocimiento tras evaluar la originalidad, rigor académico e importancia científica de los trabajos de investigación.

La Asociación Mexicana de Amigos del Instituto Weizmann de Ciencias y la Academia otorgan, en conjunto, desde 1986, este reconocimiento a las mejores tesis doctorales realizadas en México por investigadores e investigadoras menores de 35 años, en el caso de hombres, y menores de 38 años, en el de las mujeres, en las áreas de ciencias exactas y ciencias naturales. A partir de 2001 también se otorga a las mejores tesis doctorales en ingeniería y tecnología.

Ganadoras y ganadores de los Premios Weizmann 2023:

- **Ciencias exactas**
 - ♦ Gonzalo Sánchez García
Título de la tesis: *Búsqueda de nueva física a través de fenomenología de neutrinos y modelos teóricos*
Graduado en el Doctorado en Ciencias (especialidad de Física) del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
Tutor: Omar Gustavo Miranda Romagnoli, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
- **Ciencias naturales**
 - ♦ María Magdalena Zamora Corona
Título de la tesis: *Identificación del determinante funcional de la vasoinhibina: implicaciones terapéuticas y fisiológicas*

Graduada en el Doctorado en Ciencias Biomédicas del Instituto de Neurobiología de la UNAM

Tutora: María del Carmen Clapp Jiménez, Instituto de Neurobiología, UNAM

- **Ingeniería y tecnología**
 - ♦ Jesús Adolfo Mejía de Dios
Título de la tesis: *A Study on Metaheuristic Approaches for Single- and Multi-Objective Bilevel Optimization*
Graduado en el Doctorado en Inteligencia Artificial del Instituto de Investigaciones en Inteligencia Artificial de la Universidad Veracruzana
Tutor: Efrén Mezura Montes, Facultad de Matemáticas, Universidad Veracruzana

La AMC dio a conocer a las y los ganadores de los Premios de la Academia a las mejores tesis de doctorado en ciencias sociales y humanidades 2023

La Academia Mexicana de Ciencias dio a conocer los nombres de las y los ganadores de los Premios de la Academia a las mejores tesis de doctorado en ciencias sociales y humanidades 2023, los cuales se otorgan desde 1996 a investigadores e investigadoras que no hayan cumplido 38 años, en el caso de los hombres, y 40 años en el de las mujeres, y cuyas tesis se hayan realizado en el país, en alguna institución acreditada.

La convocatoria anual de este premio se lleva cabo en conjunto con nueve instituciones representativas de las ciencias sociales y las humanidades en México: la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Autónoma Metropolitana, El Colegio de México, la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, el Centro de Investigación y Docencia Económicas, el Instituto José María Luis Mora, el Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN y el Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Ganadoras y ganadores de 2023:

- **Ciencias sociales**
 - ♦ Ana Teresa Peña Hernández
Título de la tesis: *Y me dijo el doctor que ya le había cortado las alas a la cigüeña y yo ni sabía. Experiencias de parto hospitalario entre mujeres de Teopancingo, Puebla*

Graduada en el Doctorado en Ciencias Antropológicas del Departamento de Antropología de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Tutora: Laura Valladares de la Cruz, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

♦ José Antonio Melville Rubio

Título de la tesis: *Disolver y coagular: élites, corrupción y la CICIG en Guatemala*

Graduado en el Departamento de Antropología de la División de Ciencias Sociales y Humanidades de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Tutor: Pablo Castro Domingo, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

• Humanidades

♦ Blanca Azalia Rosas Barrera

Título de la tesis: *El gobierno de los mercados: espacios, sujetos y prácticas sociales en torno al comercio de alimentos en la Ciudad de México (1770-1870)*

Graduada en Historia, en el Centro de Estudios Históricos de El Colegio de México

Tutor: Diego Pulido Esteve, El Colegio de México

♦ Laura Anaíd Sierra Fajardo

Título de la tesis: *Ahora los jueces hablan bonito: dimensión ritual y eficacia simbólica del proceso penal oral que involucra personas indígenas en conflicto con la ley federal en Oaxaca, México*

Graduada en Antropología en el Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (sede Ciudad de México)

Tutora: María Teresa Sierra Camacho, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social

CITA

(Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia)

A partir de agosto de 2023, la AMC, en conjunto con el Centro de Ciencias de la Complejidad (C3) de la UNAM, dieron inicio a un nuevo programa de conferencias denominado CITA (Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia) con el fin de tener un espacio mensual en el que se reúnan miembros de distintas comunidades de la ciencia, la tecnología, la innovación, la comunicación científica y público no especializado, para intercambiar perspectivas sobre temas científicos y tecnoló-

gicos relevantes y coyunturales. Los encuentros del programa CITA son coordinados por Julia Tagüeña Parga, Coordinadora de Comunicación del C3, investigadora del Instituto de Energías Renovables de la UNAM y miembro de la AMC. El formato es presencial y también se transmite por los canales de YouTube de la AMC y del C3.

La conferencias más recientes han sido:

• 28 de noviembre de 2023

Políticas de Ciencia, Tecnología e Innovación y problemas nacionales

Martín Puchet

Facultad de Economía, UNAM

<https://www.youtube.com/watch?v=UXq2ETx-Y4o>

Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron: Gabriela Dutrénit, de la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, y José Miguel Natera, del Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM, con Julia Tagüeña, coordinadora del CITA, como moderadora.



- 30 de enero de 2024

Por una universidad de cuidados: responsabilidad social desde la complejidad

Estela Roselló Soberón

Instituto de Investigaciones Históricas y Centro de Ciencias de la Complejidad, UNAM

[HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/LIVE/AFPD_W60JOU?si=DHJGAEF-OJOc4nLK3](https://www.youtube.com/live/AFPD_W60JOU?si=DHJGAEF-OJOc4nLK3)

Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron: Araceli Mejía Olguín, de la Secretaría de Programas Institucionales de los Colegios de Ciencias y Humanidades; Xavier Soberón Mainero, del Instituto de Biotecnología y Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM, y Gabriela de la Cruz Flores, del Instituto de Investigaciones sobre la Universidad y la Educación, con Julia Tagüeña, coordinadora del CITA, como moderadora.
- 27 de febrero de 2024

Planeta enfermo: los límites de Gaia

Juan Claudio Toledo

Instituto de Ciencias Nucleares y Centro de Ciencias de la Complejidad, UNAM

[HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/LIVE/6XTMFZD_JLW?si=UQN9Bj30P-gFQG5xT](https://www.youtube.com/live/6XTMFZD_JLW?si=UQN9Bj30P-gFQG5xT)

Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron: Gabriel García, del Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM; Andrea Sáenz Arroyo, del ECOSUR, y Alejandro Frank del Instituto de Ciencias Nucleares y del Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM, con Julia Tagüeña, coordinadora del CITA, como moderadora.

Podcast científico y cultural de la Academia Mexicana de Ciencias



La Academia Mexicana de Ciencias impulsa contenidos de actualidad con interesantes pláticas y reflexiones de miembros de la Academia, así como de distinguidas y distinguidos invi-

tados. La grabación se realiza en las instalaciones de Radio UNAM, con la conducción de Alejandra Galindo y la producción de Edmundo V. Correu. Se puede acceder a los capítulos del podcast en dos plataformas y la difusión está a cargo de Eduardo González y Walter Galván.

YouTube:

<https://www.youtube.com/@AMCienias/podcasts>

Spotify:

<https://open.spotify.com/show/7zLc28wfByRM8GCnohzwGa>

Los poscasts disponibles son:

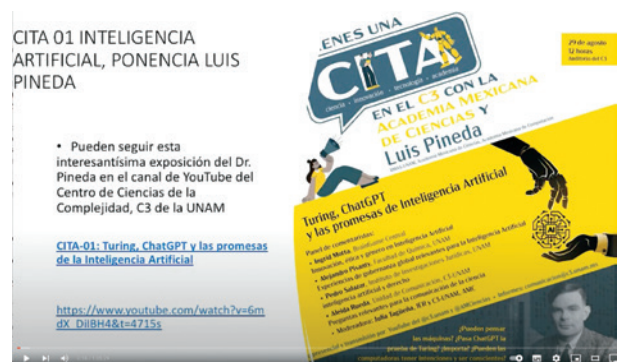
- “Inteligencia artificial (IA)”

En este episodio del podcast y en el marco de los Seminarios CITA, organizados por la AMC y el centro C3 de la UNAM, se habló de inteligencia artificial con especialistas de disciplinas como la mercadotecnia, el derecho o la programación computacional. Participaron en esta conversación la doctora Ingrid Motta (BrainGame Central), el doctor Alejandro Pisanty (Facultad de Química, UNAM) y el doctor Pedro Salazar (Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM), hablando sobre los apasionantes retos que implica la IA. Presentó el podcast el doctor José Seade, presidente de la AMC.

<https://youtu.be/QPpji15fL1M>

<https://open.spotify.com/episode/2AfQYKs98FTJ-0mW34A5Gt3>
- “Inteligencia artificial (IA), charla con el Dr. Luis Pineda del IIMAS-UNAM”

En esta charla el doctor Luis Pineda (IIMAS-UNAM), quien recientemente impartió la conferencia “Turing, ChatGPT y las promesas de la IA” en el C3 de la UNAM, como parte de los seminarios del programa CITA, compartió su trayectoria como



científico, docente e investigador y habló de sus reflexiones, experiencias y de los retos que él identifica en la IA.

<https://youtu.be/jmEPixw6WRA>

<https://open.spotify.com/episode/7w3FGJc1aYJFkmWiml-PqRX>

- “Mujeres en la divulgación científica, seminarios CITA en el C3 de la UNAM”

Este episodio se dedicó a escuchar y compartir con las audiencias la amplia visión de dos mujeres universitarias y divulgadoras de la ciencia, la doctora Julia Tagüeña (IER-UNAM y miembro de la AMC) y la maestra Aleida Rueda (C3-UNAM, periodista), quienes reflexionaron sobre el trabajo que realizan desde el C3 de la UNAM coordinando y haciendo posibles los seminarios del programa CITA. También comentaron sobre su perspectiva respecto a la ciencia, la educación y los temas del CITA que vendrán más adelante.

<https://youtu.be/aBtvI50Vki8>

<https://open.spotify.com/episode/7FQBHiAaulrq1zByjO-5Jqe>

- “Salud mental”

El 10 de octubre se conmemora el Día Mundial de la Salud Mental. Presentamos valiosas conversaciones para concientizar sobre la importancia de visibilizar la salud mental como un aspecto prioritario en nuestras vidas. Platicamos con expertas de acciones que se llevan a cabo desde la academia e instituciones para atender a grupos específicos, como los estudiantes universitarios y el personal de salud. Un agradecimiento sincero por su participación a la doctora María Elena Medina Mora, directora de la Facultad de Psicología de la UNAM y miembro de la AMC, y a las doctoras Corina Benjet, Silvia Morales Chainé y Rebeca Robles, quienes compartieron sus importantes investigaciones y proyectos: “Mi salud”, “Cuidemos a quien nos cuida” y “Yo puedo sentirme bien”. Un reconocimiento a las personas que se dedican a la atención de la salud de la ciudadanía. Porque ¡no hay salud sin salud mental!

<https://youtu.be/0qhajmnGEHw>

<https://open.spotify.com/episode/3UwJsAimNwRXguc-4dGMTqO?si=prJCTkgoTlyF6FghZKstDQ>

- “Evolución”

Los invitamos a escuchar la conversación con el doctor Antonio Lazcano, destacado científico mexicano, miembro



de la Academia Mexicana de Ciencias y Premio Universidad Nacional 2023, quien nos platica sobre los virus, cómo evolucionan y diversos aspectos interesantes relacionados con nuestra convivencia con las demás especies. El doctor Lazcano habló también sobre su vocación como científico, como universitario y su visión acerca de la importancia de la ciencia y la cultura en nuestras vidas.

<https://youtu.be/v90qHG7dEcQ>

<https://open.spotify.com/episode/01znzNulG3H3ZozOhLbXac?si=hzpBjHWiQXOpalShl0A43w>

- “Geología en México. Visita al Museo del Instituto Nacional de Geología”

En este episodio compartimos un interesante recorrido por uno de los recintos museísticos más emblemáticos de la Ciudad de México: el Museo de Geología de la UNAM, espacio que cuenta con las colecciones más importantes del patrimonio geológico de nuestro país. Nuestros anfitriones, el doctor Luis Espinosa, director del museo, y la paleontóloga Fernanda Alejandre nos muestran las salas y el espacio arquitectónico, un edificio decimonónico representativo de la colonia Santa María la Ribera en la Ciudad de México. Una visita apasionante cuyo propósito es invitar a recorrer sitios culturales y científicos de nuestra ciudad, como el Museo de Geología, de la mano de sus promotores, para aprender de ciencia y, por qué no, disfrutar con nuestros seres queridos de interesantes detalles, como en esta ocasión, de la vida e historia de nuestro planeta.

https://youtu.be/inXMsrzEFAU?si=RCLWJ_ErIaV3u-gq

<https://open.spotify.com/episode/7LjGrHU99aKPSdELDT-NbA?si=urTQItWfS7y3ZCQAIMqWLA>

**Charlas con autores
de la revista *Ciencia de la AMC***

Continúan las pláticas de autores que, habiendo colaborado en diferentes números de la revista *Ciencia de la AMC*, presentan a través de las redes sociales de la revista aspectos interesantes de sus investigaciones. Las charlas más recientes han sido:

5 de diciembre de 2023

“ChatGPT, el nuevo y asombroso *chatbot* de inteligencia artificial”

Adolfo Guzmán Arenas

Centro de Investigación en Computación, IPN

<https://www.youtube.com/live/vAyu78s6K8l?si=PeshKN-ChSZ7Hx8e8>



19 de diciembre de 2023

“Novedades científicas desde la Universidad Autónoma Metropolitana”

Genaro Hernández Camacho, UAM-Azcapotzalco

Silvia Hidalgo Tobó de la UAM-Iztapalapa

Marcos López Pérez, UAM-Lerma

<https://www.youtube.com/live/pRmzh36pzSc?si=SALzH7S-JHoZrwiX>

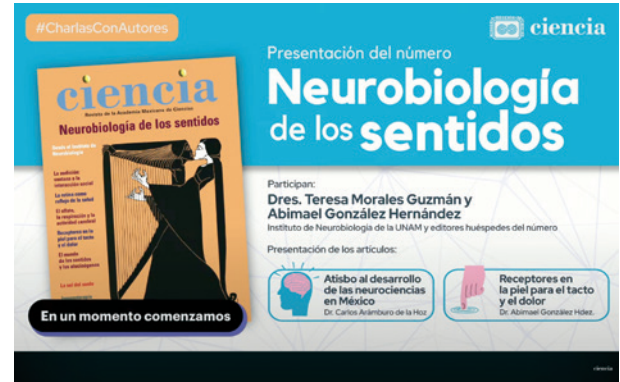
23 de enero de 2024

“Presentación del número *Neurobiología de los sentidos*”

Teresa Morales Guzmán, Abimael González Hernández, Carlos Arámburo de la Hoz

Instituto de Neurobiología, UNAM

<https://www.youtube.com/live/hF1T0kEQx4c?si=vQPraBqmg-Y3iY9JX>



31 de enero de 2024

“¿Sabías que los ojos pueden ayudar a diagnosticar el riesgo de diabetes?”

Stéphanie Thébault

Instituto de Neurobiología, UNAM

<https://www.youtube.com/live/yKzBCET-biU?si=lzcWbl-FM9bTsnsCg>

6 de febrero de 2024

“El olfato, la respiración y la actividad cerebral”

Fernando Peña Ortega

Instituto de Neurobiología, UNAM

<https://www.youtube.com/live/hx1x0ELShvY?si=xeR1R-DO-24ag3bdh>

20 de febrero de 2024

“La audición: ventana a la interacción social”

Hugo Merchant

Instituto de Neurobiología, UNAM

<https://www.youtube.com/live/04IKPntyJEG?si=MX6n-1nU111luVtxX>



5 de marzo de 2024

“¿Por qué me gusta la comida que me gusta?”

Luis Tellez Lima

Instituto de Neurobiología, UNAM

https://www.youtube.com/live/0_k5T60Nxls?si=4mInUoSli-fNnVLCK

19 de marzo de 2024

“El mundo de los sentidos y los alucinógenos”

Monserrat Armenta Reséndiz

Universidad Médica de Carolina del Sur

https://www.youtube.com/live/pjNYGn1dYb8?si=OvVlt_N9fo-FHPwDr

26 de marzo de 2024

“La enfermedad de Alzheimer y su impacto en la percepción”

David Alcántara González

Center for Dementia Research, Nathan Kline Institute for Psychiatric Research, Nueva York

<https://www.youtube.com/live/dUL1W91cw58?si=TRUfFcv-0GGNFhNNz>

Webinar

“Tu mundo con ciencia”

Continúa el ciclo de conferencias “Tu mundo con ciencia”, impartido por exbecarias ganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L’Oréal-Unesco-AMC. Las pláticas se llevan a cabo el segundo jueves de cada mes y son transmitidas por los canales de las redes sociales de la AMC. Las conferencias están orientadas a jóvenes de nivel bachillerato, para fomentar las vocaciones científicas. En el mes de agosto de 2023 inició su tercera temporada. Las conferencias más recientes son:

14 de diciembre de 2023

“Hormonas y dolor, una increíble conexión”

Sara Luz Morales Lázaro

Instituto de Fisiología Celular, UNAM

<https://www.youtube.com/live/lwKQLvLGLyI?si=0ybKUg5YY-bikFBcG>



11 de enero de 2024

“Ritmos circadianos para la salud”

Lucía Mendoza Viveros

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C.

<https://www.youtube.com/live/8mfLdUR0e-E?si=ezRIO-f5Cx-1dij55>

8 de febrero de 2024

“Viaje epigenético: de gemelos idénticos a plantas albinas”

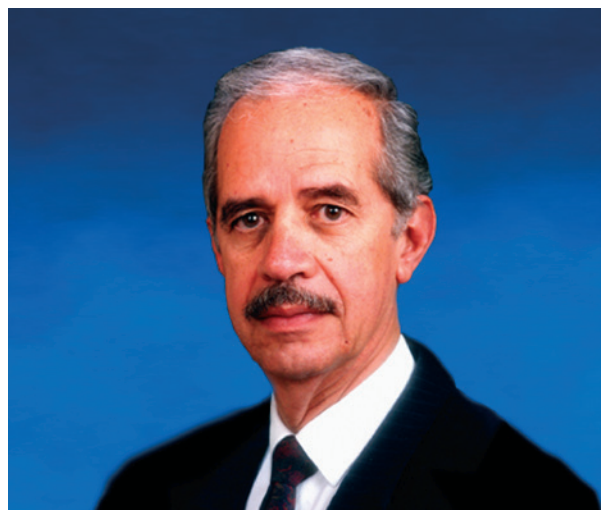
Clelia de la Peña Seaman

Centro de Investigación Científica de Yucatán

<https://www.youtube.com/live/IQ0qmfS09-w?si=-RlcBNACa-GoE1kAs>

Obituario

La Academia Mexicana de Ciencias lamenta profundamente el fallecimiento del doctor Carlos Gual Castro, quien fuera presidente de la AMC en 1974.



En nuestro próximo número
de julio-septiembre de 2024

COMUNICACIONES LIBRES

