

La vida en lo profundo de la Tierra

DAVID ROMERO CAMARENA

El Dr. Romero es investigador del Centro de Ciencias Genómicas de la Universidad Nacional Autónoma de México, en Cuernavaca, Morelos. Su área de especialidad es la genómica bacteriana, con énfasis en mecanismos de cambio en genomas. Es miembro y expresidente de la Academia de Ciencias de Morelos.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Descende, audax viator, et terrestre centrum attinges
(Desciende, audaz viajero, y alcanza el centro de la Tierra)
Julio Verne (1828-1905)
Viaje al centro de la tierra

El conocer las diferentes formas de vida en nuestro planeta y sus sorprendentes y frecuentemente hermosas manifestaciones es algo que nos interesa a todos y que ha mantenido alegremente ocupados a los biólogos a lo largo de la historia. Y hemos explorado todos los ambientes posibles. Todas las masas terrestres, incluyendo los polos, sus cuerpos de agua, como ríos y lagos, los mares, inclusive nuestra atmósfera. La exploración de lo profundo de los mares se resistió por un tiempo, pero fue posible hacerlo hacia mediados del siglo XX, con la exploración con naves no tripuladas a gran profundidad. Recordemos tan solo la exploración submarina transmitida por televisión en 2025 en el mar de Argentina, que nos fascinó con

la belleza de lo profundo. Parecería que todos los ambientes ya han sido explorados y podemos descansar un rato. Pero no es así. Hay un ambiente que aún hoy permanece poco explorado y que por su extensión no debemos ignorar: la vida por debajo de la superficie. La vida en el interior de la Tierra.

Y es que explorarla no es tarea sencilla. Hablamos de la posibilidad de vida a centenares de metros, incluso kilómetros por debajo de la superficie. Acceder al interior de la tierra por mucho tiempo fue solo posible a través de cavernas y grutas subterráneas, o a través de minas. A finales del siglo XIX y principios del XX, debido a las explotaciones petroleras, se desarrolló la tecnología para hacer perforaciones del subsuelo que alcanzan kilómetros de profundidad. Y los científicos pudieron entonces usar esa tecnología para averiguar si existía vida en el subsuelo y hasta qué profundidad podía encontrarse (Figura 1). Por primera vez hubo la posibilidad de explorar un ambiente desconocido a lo largo de la historia. Acompañenme a un vistazo incompleto, pero muy sorprendente, de la vida en las profundidades.

De profundis

Vivir en el subsuelo profundo no debe de ser fácil. Imaginemos un ambiente dominado por diferentes tipos de rocas, una masa sólida interrumpida apenas por poros o fracturas en las rocas. Un ambiente de oscuro debido a la ausencia de luz solar y con cantidades muy reducidas o incluso carentes de oxígeno y agua. Un submundo en el cual la materia orgánica de la cual pueda alimentarse un orga-

nismo es muy escasa, si acaso accesible como materia orgánica sepultada durante años de evolución en la tierra, como en la vecindad de depósitos de petróleo. Y para hacerlo más difícil, con acidez extrema y posibles metales tóxicos. Pero hay dos dificultades aún mayores: la presión y la temperatura en el subsuelo.

La presión es un problema importante. En la superficie de la Tierra, la presión es causada por la columna de aire sobre nosotros. Aunque hay diferentes unidades para medirla, es común medirla en Pascales (Pa) y por conveniencia, expresarla en millones de Pascales (MPa). En la superficie de la Tierra, a nivel del mar, la presión atmosférica es solamente de 0.101 MPa. En el interior de la Tierra hay presión, pero esta es causada por el peso de las capas superiores de roca (*presión litostática*), aumentando conforme aumenta la profundidad. Se ha determinado que en el subsuelo la presión aumenta en aproximadamente 33 MPa por cada kilómetro de profundidad, de modo que a cinco kilómetros de profundidad sería de 165 MPa. Esta enorme presión es la alcanzada por algunas prensas hidráulicas industriales.

El segundo problema importante es la temperatura. Dado que el núcleo terrestre está a alta temperatura, conforme nos acercamos a él habrá un aumento en temperatura en el subsuelo. Esto es lo que experimentaríamos si trabajáramos en una mina sin condiciones de ventilación. Se ha determinado que la temperatura se incrementaría en 25°C por cada kilómetro de profundidad, llegando entonces a 125°C o más a cinco kilómetros de profundidad. Es una temperatura similar a

la alcanzada en procesos de esterilización de alimentos (121°C). Un ambiente oscuro, apretado, sin oxígeno, con poco o nulo alimento y por añadidura ácido, tóxico, con un calor sofocante y una presión enorme. ¿Qué puede vivir allí?

La diversidad en el subsuelo profundo

Para estudiar la diversidad en el subsuelo profundo, se han estudiado una gran variedad de sitios en la Tierra, ya sean explotaciones mineras, drenajes de minas y perforación de núcleos de roca, todo ello a kilómetros de profundidad. No se espera encontrar organismos de gran tamaño debido a las limitaciones del ambiente, sino microorganismos de diversos tipos. Para ello, se ha empleado concentración por filtros que retienen microorganismos, observación microscópica directa de las rocas y, con lo obtenido por filtración del agua extraída, secuenciación directa del material genético presente y su ensamble utilizando las técnicas de las ciencias genómicas, un enfoque conocido como *metagenómica*. Lo hallado es sorprendente: en todos los ambientes explorados, hasta profundidades de 4 km, se han encontrado microorganismos, tanto bacterias como arqueas. La abundancia a la que se encuentran es pequeña, pero considerando una franja de cuatro km de profundidad abarcando toda la Tierra, el número estimado de microorganismos es sorprendente. Se ha estimado en 3×10^{29} microorganismos en el subsuelo (sí, trescientos mil billones de billones de microorganismos), lo cual representa el 30% de los microorganismos estimados para toda la Tierra.

¿Cómo pueden vivir estos organismos en el subsuelo? Gracias al análisis de su genoma, se han podido encontrar adaptaciones que permiten soportar las enormes presiones y temperaturas existentes en su ambiente. Pero no solo se trata de soportar estas condiciones: la vida requiere asimilar nutrientes para poder multiplicarse. Estos microorganismos tienen un metabolismo que les permite aprovechar las pocas fuentes orgánicas de carbono disponibles en lo profundo (como petróleo y otros microorganismos muertos). Pero también tienen formas especiales que les permiten usar el carbono inorgánico presente en el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) del subsuelo y usarlo, en conjunto con el hidrógeno (H_2) para generar energía (Figura 2). Este metabolismo tan particular es ayudado con el aprovechamiento de compuestos presentes en las rocas, como los iones sulfato (SO_4^{2-}), sulfuro ácido (HS^-) y el ion férrico (Fe^{3+}).

¿Qué tipo de vida llevan los microorganismos del subsuelo? A diferencia de los microorganismos de la superficie, que se multiplican en rangos que van de minutos a horas, días o a lo más meses, en el caso de los microorganismos del subsuelo se estiman velocidades de división en el orden de años, inclusive centenas de años. Es una vida lenta, pero no solitaria. Se ha

descrito la existencia de consorcios de microorganismos del subsuelo profundo que cooperan para llevar a cabo el metabolismo que les permite alimentarse. Pero también existen posibles ataques entre ellos. Varios de los microorganismos detectados poseen genes que les permiten resistir la acción de antibióticos. Debido al aislamiento de estos ambientes de las actividades humanas, se piensa que los antibióticos en ese ambiente son producidos por otros microorganismos en el subsuelo. Como era de esperarse, también hay virus en el subsuelo que aprovechan a los microorganismos existentes. La vida, con fenómenos de competencia y cooperación tanto en la superficie terrestre como en los mares, también procede así en el subsuelo profundo. La diversidad de estrategias es muy grande y sería difícil reseñarlas todas. Hablemos solo de dos organismos, como ejemplo de lo sorprendentes que son.

El viajero audaz en busca de azúfre

Si, así es como se traduce el nombre científico de *Candidatus Desulforudis audaxviator*, una bacteria de lo profundo (Figura 3). Esta bacteria se describió originalmente en la poca agua existente en la mina de oro Mponeng en Sudáfrica, a una profundidad de 1.8 km. En ese ambiente en particular la bacteria era muy abundante y la secuenciación de su genoma reveló detalles fascinantes. *D. audaxviator* puede convertir carbono inorgánico en carbono orgánico, pero también convertir el nitrógeno gaseoso en amonio (proceso conocido como *fijación de nitrógeno*), con lo cual puede incorporarlo para sus necesidades vitales. Puede también acoplar la reducción del sulfato con el hidrógeno (Figura 2) y oxidar el formato para producir energía. Esto le permite una vida autosuficiente (*autótrofa*), usando los compuestos inorgánicos presentes en su entorno. Si las circunstancias lo permiten, puede cambiar su metabolismo a uno en el que aproveche los compuestos orgánicos en su entorno (*heterótrofa*), consumiendo otros microorganismos. Originalmente se pensaba que era un organismo presente en solo una localidad, pero exploraciones más recientes lo han encontrado en el subsuelo profundo de muchas partes del mundo, a profundidades de hasta 4 km, manteniendo una identidad en su genoma muy elevada.

Hasta ahora hemos hablado de organismos procariontes (las mejor conocidas como bacterias que carecen de un núcleo que envuelva a su material genético), pero también se encuentran unos pocos eucariontes (con un núcleo). Tal es el caso del llamado "gusano del diablo" (*Halicephalobus mephisto*) Este es un gusano (*helminto*) con longitud de hasta medio milímetro, que se encontró en el agua presente en una fractura de rocas en la mina Beatrix (Sudáfrica), a una profundidad de 1.3 km (Figura 3). Es un gusano *aeróbico* (requiere oxígeno para vivir) y encuentra el oxígeno necesario en el agua de la fractura, la cual se estima quedó atrapada hace 3000-12000 años. Así, puede vivir en concentraciones bajas de oxígeno e incluso sobrevivir por periodos largos en ausencia de oxígeno (*anaerobiosis*). Para su alimentación, consume bacterias presentes en el subsuelo profundo, desafiando otras bacterias de la superficie, como *Escherichia coli*. Al caracterizar su genoma, se encontró una abundancia elevada de genes que codifican para la proteína Hsp70, que ayuda a la protección contra altas temperaturas. Es un gusano que se multiplica de manera asexual (esto es, sin necesidad de una pareja, en un proceso conocido como *partenogénesis*). Ha de ser difícil encontrar pareja a esas profun-

tidades...
¿Por qué tanto interés en la vida en el subsuelo profundo?
 Confío en que se hayan dado cuenta de que si nos interesa conocer las formas de vida presentes en nuestro planeta, no podemos ni debemos ignorar un ecosistema tan vasto como el subsuelo profundo. Pero esto tiene también intereses prácticos. Ante la crisis actual por la resistencia a antibióticos, se torna muy necesario buscar nuevos antibióticos, que podrían encontrarse en estos microorganismos del subsuelo. La exploración de la producción de antibióticos por microorganismos en el subsuelo apenas comienza, pero de encontrarse nuevos compuestos antibióticos podrían ser la solución a este importante problema de salud pública. La minería y la explotación petrolera son formas en las que los seres humanos hemos perturbado ese delicado ecosistema subterráneo. Pero la modificación que podrían generar nuevas prácticas, como el *fracking* o los intentos para sepultar en las profundidades de la tierra el CO_2 producto del cambio climático, podrían alterar aún más esos ecosistemas. Sería una lástima y una imprudencia destruir ecosistemas antiguos que apenas comenzamos a conocer. Es indudable que la vida en el subsuelo profundo encuentra condi-

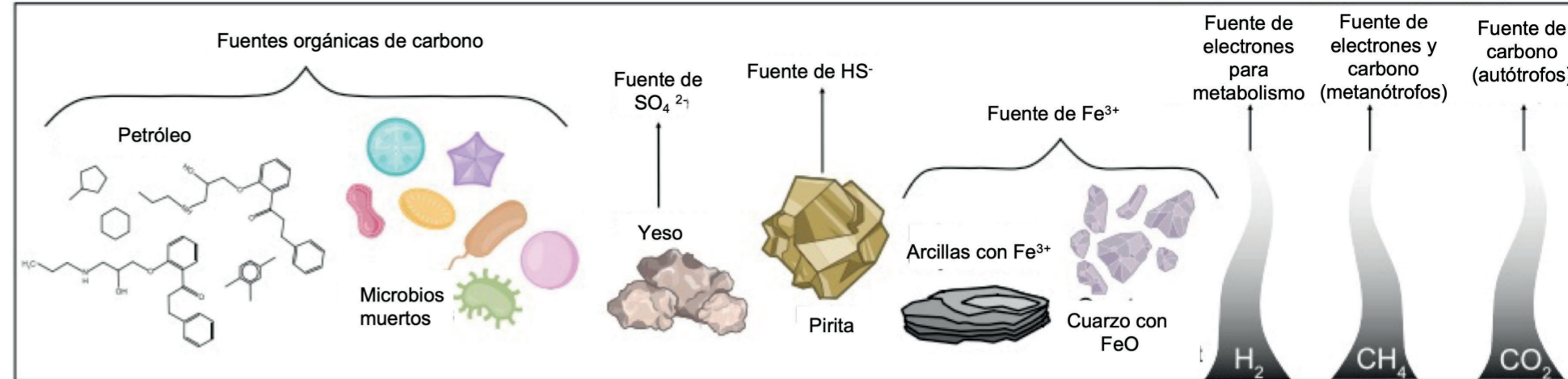
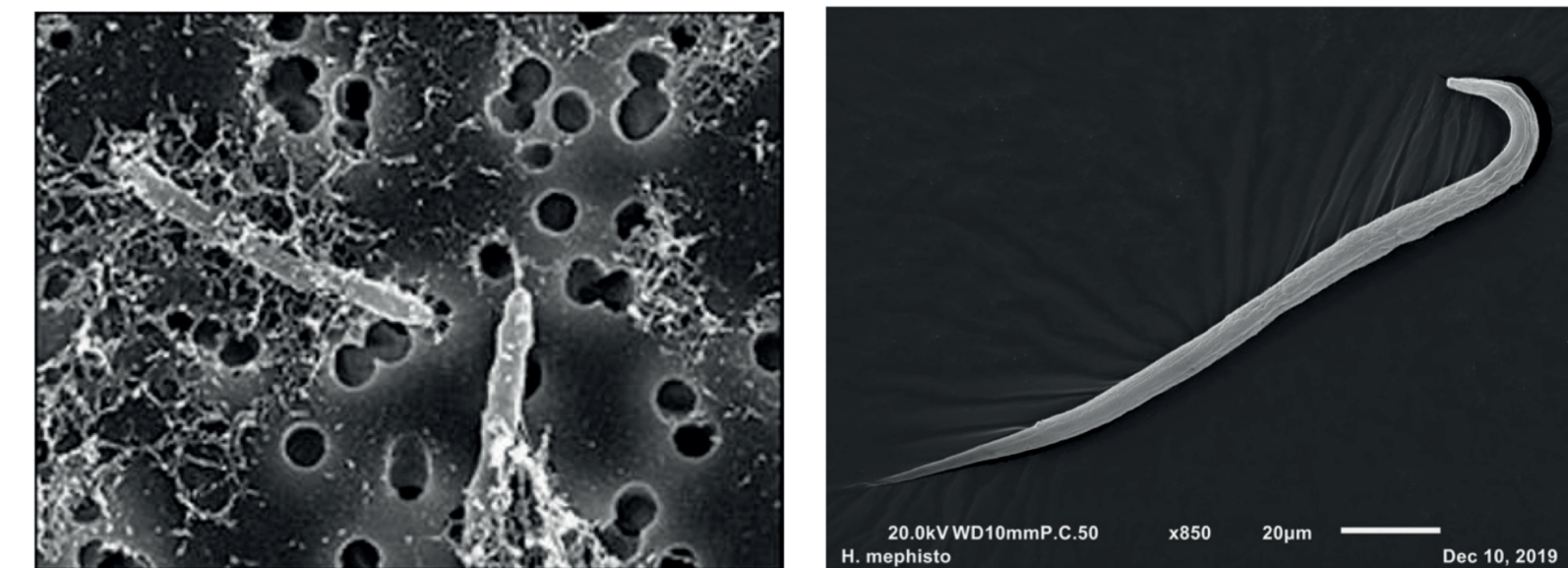


FIGURA 2. El metabolismo poco usual de los microorganismos del subsuelo profundo. Fuente: adaptada y traducida de una figura en la referencia (2).

¿Qué seres vivos hay en el subsuelo? ¿Qué cosas nuevas podremos hacer con ellos?



FIGURA 1. Explorando la diversidad en las profundidades de la Tierra. Fuente: *Where wild microbes grow* (<https://joides-resolution.org/wp-content/uploads/2017/06/Where-Wild-Microbes-Grow-Final.pdf>).



Candidatus *Desulforudis audaxviator* Halicephalobus *mephisto*

FIGURA 3. Dos ejemplos de organismos del subsuelo profundo. La bacteria *Candidatus Desulforudis audaxviator* y el "gusano del diablo" el nemátodo *Halicephalobus mephisto*. Fuente: composición propia, con imágenes tomadas de https://www.ecured.cu/images/4/45/Audax_Viajera.jpg y <https://communities.springernature.com/posts/behind-the-lucky-discovery-of-halicephalobus-mephisto-the-devil-worm>

ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org
 ¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTACTANOS: coord.comite.editorial.acmor@gmail.com