

Los límites de la biología bajo la superficie terrestre se extienden más allá de lo que se sospechaba.

Amanda Leigh Mascarelli indaga en la vida de los microorganismos de las profundidades.



Geomicrobiología:
los bajos fondos

En febrero, un equipo de oceanógrafos americanos y alemanes emprendió viaje hacia un destino poco conocido en mitad del Océano Atlántico llamado North Pond. Esta parcela de suelo marino yace sobre el flanco oeste de la Dorsal Mesoatlántica, el sistema montañoso más largo del mundo, en el que la topografía del fondo del océano desciende para formar una cuenca de 10 kilómetros de longitud bordeada por picos submarinos.

Durante dos semanas, Katrina Edwards, geomicrobióloga de la Universidad de California del Sur en Los Ángeles, y su equipo exploraron North Pond y recogieron muestras de los sedimentos cenagosos que llenan la cuenca. Desde su barco, hicieron descender tubos de extracción de núcleos hasta 4,5 kilómetros de profundidad y penetraron en el fango del fondo. En los días más afortunados, el equipo atravesaba directamente el sedimento y golpeaba las rocas que hay debajo, doblando el tubo de extracción de núcleos como si fuera un plátano. Aunque debido a las colisiones fue necesario sacrificar algunos tubos, también consiguieron muestras de la delicada frontera entre la roca y el sedimento, uno de los mayores objetivos en la lista de deseos de los investigadores.

Edwards ha recorrido 7.000 kilómetros para buscar “microorganismos intraterrestres”, los microbios del interior de los sedimentos y de las rocas subyacentes, donde, hasta no hace mucho, se pensaba que no podía existir vida. Katrina pertenece a un grupo de científicos que están estudiando lo resistente e invasiva que es la vida en las profundidades de la tierra, tanto bajo el suelo marino como en el interior de la corteza continental. Apodada por sus compañeros la “doncella de hierro”, Edwards está especialmente interesada en aquellas formas de vida que se alimentan de hierro y que colonizan algunos de los terrenos más inhóspitos de la Tierra: la corteza ígnea, que alcanza unos 500 metros bajo el fondo oceánico. “Lo que estudio fundamentalmente es la caries de la Tierra, los microbios que habitan en lo más recóndito de las muelas de la Tierra expuestas en el fondo del océano”, declaró Edwards.

Estas áreas eran en gran medida inaccesibles hasta la década de los noventa, en que las

nuevas técnicas permitieron a los científicos hacer observaciones directas de esta biosfera profunda. En particular, los oceanógrafos han desarrollado laboratorios en el subsuelo marino conocidos como sistema de prevención de la circulación entre océano y pozo (CORK, por sus siglas en inglés), en los que los instrumentos científicos se sellan en el interior de los pozos de perforación profundos y se realizan mediciones en tiempo real de la vida en las esferas más profundas y oscuras del subsuelo marino. Hasta la fecha, los investigadores han organizado únicamente una misión científica de perforación, en 2002, que estuvo dedicada por completo a esta biosfera, pero están a punto de lanzar cuatro más en 2013 a través del Programa Internacional Integrado de Perforación Oceánica. Según Edwards, que planea volver a North Pond en uno o dos años, “estamos directamente en la cúspide de este importante avance”.

Los estudios de North Pond y de otras zonas de todo el mundo están cambiando la forma de pensar de los científicos acerca de la biosfera profunda. Hace diez años, estos microbios de los “bajos fondos” se consideraban en gran medida curiosidades que representaban una de las últimas fronteras de la Tierra. Actualmente, los científicos han llegado a apreciar a estos organismos como parte integral de los ciclos del planeta, que ayudan a restablecer los minerales fundamentales del océano e incluso intervienen en el clima. “A medida que la ciencia madura, se plantea un interrogante continuo sobre lo que hay ahí abajo, pero también estamos llegando a comprender cómo están implicados en el ciclo biogeoquímico y en la salud de nuestro planeta”, comenta Rick Colwell, geomicrobiólogo de la Universidad del Estado de Oregón en Corvallis (véase el recuadro “Valor para la minería de la vida en las profundidades”).

Los nuevos hallazgos también conducen a la comprensión de los orígenes de la vida de la Tierra y de cómo podría existir vida en otros planetas. Aunque se han descubierto microbios prácticamente en todos los sitios en los que los científicos han investigado, a menudo parecen subsistir al filo mismo de la supervivencia, con un metabolismo tan lento que ha suscitado nuevas ideas sobre los límites de la vida.

Un sándwich en las profundidades marinas

En 1955, Claude ZoBell, considerado el padre de la microbiología marina, investigó bajo el suelo marino y encontró microbios que disminuían en número conforme se descendía hasta una profundidad de aproximadamente 8 metros¹. En ese momento, los investigadores pensaban que la vida se extinguía en algún punto no muy lejano por debajo del lecho marino. Posteriormente, a finales de la década de los sesenta, un experimento accidental apoyó la idea de unas profundidades marinas empobrecidas, cuando el sumergible de investigación Alvin se hundió a más de 1.500 metros tras la rotura de un cable. Los tres tripulantes se pusieron a salvo a través de la escotilla, pero sus almuerzos cayeron al fondo. Cuando se recuperó el recipiente 10 meses después, la tripulación se sorprendió al encontrar sus sándwiches de mortadela y las manzanas empapados pero en unas condiciones prácticamente idénticas a las originales, sin mostrar signos de descomposición microbiana. Como comentó John Parkes, geomicrobiólogo de la Universidad de Cardiff, en Reino Unido, “ésta era la visión popular de las profundidades marinas, demasiado extrema incluso para una vida bacteriana significativa”.

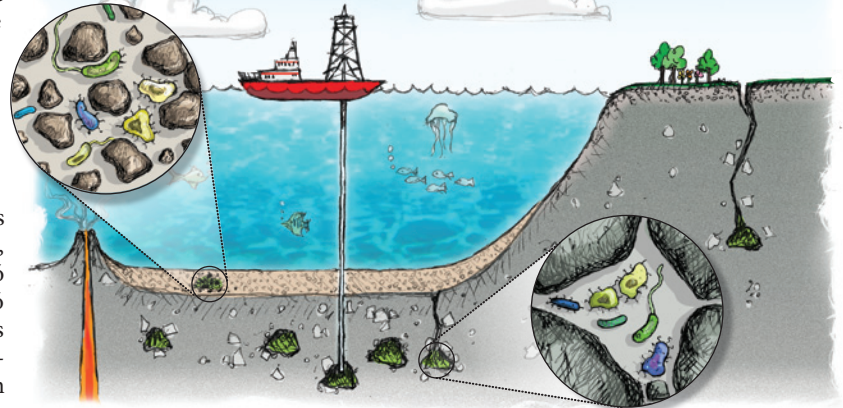
La noción de las profundidades marinas como un desierto inhabitable persistió durante décadas, distorsionando el pensamiento sobre el suelo marino y lo que yace bajo él. Después, en las décadas de los ochenta y noventa, algunas de las primeras misiones del Programa de Perforación Oceánica permitieron a los investigadores perforar más profundo de lo que se había hecho hasta entonces. Cuando en 1990 Parkes y sus colaboradores intentaron publicar en *Nature* los resultados que demostraban que las bacterias podían colonizar profundidades en el subsuelo mayores de lo que previamente se pensaba, se toparon, según Parkes, con “revisiones muy escépticas” y el artículo fue rechazado. Pero en 1994 consiguieron publicar sus resultados y describieron microorganismos viables que vivían en los sedimentos oceánicos a profundidades superiores a 500 metros por debajo del lecho marino².

Bichos activos

Este y otros estudios posteriores demostraron que se podían cultivar microorganismos a partir de muestras obtenidas muy por debajo del lecho marino. Pero las técnicas en ese momento no podían demostrar de forma definitiva que los organismos estaban vivos y con un metabolismo activo a profundidades tan considerables, dejando abierta la posibilidad de que las bacterias profundas estuvieran aletargadas, a duras penas vivas. Pero en 2005, los investigadores dirigidos por Axel Schippers, del Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Hannover, en Alemania, demostraron la presencia de membranas y ribosomas intactos³, la primera prueba concluyente de que había bacterias creciendo en sedimentos de 16 millones de años de antigüedad

LOS OSCUROS SECRETOS DE LAS PROFUNDIDADES

Se han encontrado comunidades microbianas subterráneas en los sedimentos del subsuelo marino, en la corteza oceánica subyacente y muy por debajo de la superficie de los continentes.



N. SPENCER

a más de 400 metros de profundidad. El año pasado se describieron microorganismos metabólicamente activos en sedimentos de 111 millones de años de antigüedad enterrados a una profundidad de 1,6 kilómetros por debajo del lecho marino⁴.

Se sabe tan poco sobre los microbios que habitan en las profundidades que los científicos tienen una ardua tarea para estimar qué fracción de vida representan. Hace una década, las estimaciones derivadas del trabajo de William Whitman, de la Universidad de Georgia en Atenas, y sus colaboradores⁵ sugirieron que un tercio de la vida total de la Tierra vive en los sedimentos del subsuelo marino. Pero la mayoría de las muestras de los microorganismos de los sedimentos profundos se han recogido cerca de la costa, lo que significa que gran parte del océano no está representado. Steven D’Hondt, oceanógrafo de la Universidad de Rhode Island en Narragansett, tomó muestras recientemente de los sedimentos de subsuelo marino de los océanos Pacífico Norte y Pacífico Sur. Según los resultados que D’Hondt y sus colaboradores presentaron el pasado diciembre en una reunión de la Unión Geofísica Norteamericana en San Francisco, estos hallazgos sugieren que la riqueza de células a nivel global puede ser un orden de magnitud inferior a lo que se estimó previamente. Aunque, como comenta Edwards, las cifras de Whitman no incluían los microorganismos que viven en la corteza oceánica, que tendrían que añadirse a los recuentos de células estimados.

Estos microbios ocultos se están descubriendo en otros lugares inesperados. A finales de los noventa, los investigadores que medían la profundidad de la corteza continental en una mina de oro de Sudáfrica descubrieron microorganismos que vivían a aproximadamente 3 kilómetros bajo la superficie. Ahora existen planes para comenzar la perforación de la mina más profunda de Norteamérica: Homestake, en Dakota del Sur, que alojará el Laboratorio Subterráneo Profundo de Ciencia e Ingeniería de Estados Unidos. La mina alcanza una profundidad de casi 2,5 kilómetros y los investigadores esperan perforar la roca desde esa profundidad con temperaturas que superan los 120 °C. Tom Kieft, microbiólogo medioambiental del Instituto de Minas y Tecnología de Nuevo México, en Socorro, ha comentado que “actualmente se desconoce el punto

Katrina Edwards toma muestras de una roca del lecho marino del Atlántico.



J. SYLVAN

más profundo de la biosfera. “Si perforamos a la profundidad suficiente, llegaremos más allá del límite superior de temperatura para la vida, que se cree está alrededor de 121 °C”.

Los organismos que viven en la biosfera profunda tienen poca semejanza con las bacterias de la superficie como la *Escherichia coli*, que se puede cultivar fácilmente en el laboratorio y se divide en pocos minutos. Como afirma Bo Baker Jørgensen, biogeoquímico de la Universidad de Aarhus en Dinamarca, en el subsuelo marino, las bacterias y otros grupos de microorganismos llamados arqueas son comparativamente lentos. En el caso de los organismos enterrados bajo la superficie de los continentes, las primeras estimaciones sugerían que se reproducían en una escala temporal medida en siglos⁶. Y Tullis Onstott, geomicrobiólogo de la Universidad de Princeton, en Nueva Jersey, que fue pionero en muchas de las exploraciones de la vida terrestre profunda en las minas de oro de Sudáfrica a finales de la década de los noventa, estima que los microbios que hay bajo la superficie se pueden reproducir una vez cada 1.000 años.

Crisis energética

Incluso con estas bajas tasas metabólicas, sigue sin estar claro cómo estos organismos se mantienen a sí mismos. Según Parkes, “cuando realizamos los cálculos, no existe suficiente energía ahí abajo en absoluto para estos microorganismos. Deberían estar todos muertos”.

El escaso alimento presente en los sedimentos de las profundidades marinas procede de los estratos iluminados por el sol. Ahí, las plantas y algas fotosintéticas digieren la materia orgánica que finalmente precipita en forma de células de algas muertas, materia fecal y detrito marino. Se asienta en el suelo marino y se acumula en los sedimentos durante millones de años. Los científicos estiman que la mayoría de las comunidades microbianas bajo el lecho marino se alimentan de este carbono orgánico enterrado en profundidad, contribuyendo al “ciclo del carbono de las profundidades”. Únicamente aquellos microorganismos que están bajo el suelo marino pueden metabolizar estos residuos orgánicos arenosos.

Como las lombrices que socavan el suelo y reciclan los minerales y nutrientes, estos microbios del subsuelo marino producen dióxido de carbono y metano y liberan elementos clave como nitrógeno, azufre y fósforo a partir de los sedimentos. Y cuando los fluidos circulan a través de la corteza, transportan microbios que pueden erosionar la roca, liberando hierro y otros elementos. Los fluidos

que circulan devuelven estos nutrientes al océano, donde pueden alimentar el crecimiento de nueva biomasa. Como comenta Andreas Teske, microbiólogo de la Universidad de Carolina del Norte, en Chapel Hill, “el ciclo del carbono de los océanos y del planeta Tierra llega hasta la profundidad de la biosfera bajo la superficie y no puede entenderse sin la contribución del subsuelo”.

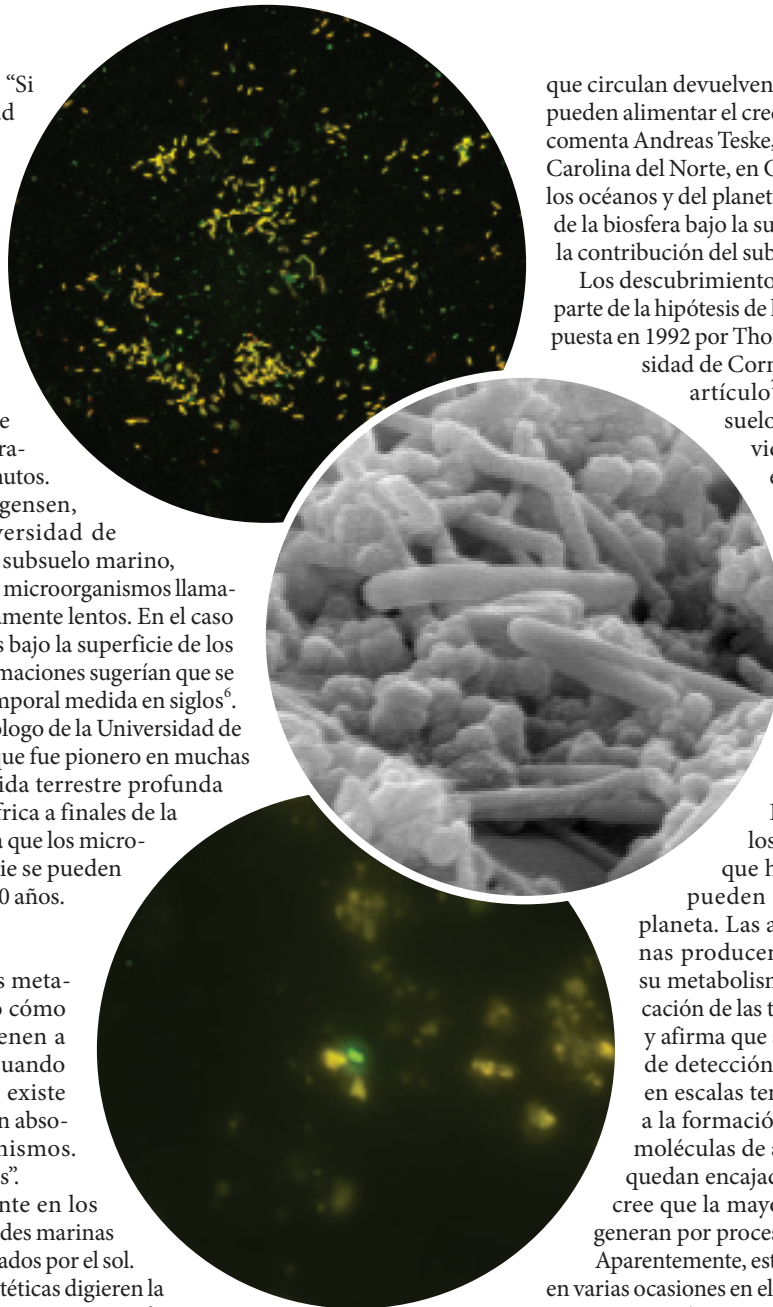
Los descubrimientos de la pasada década apoyan una parte de la hipótesis de la “biosfera profunda caliente”, propuesta en 1992 por Thomas Glod, astrónomo de la Universidad de Cornell, en Nueva York. En un famoso artículo⁷, Gold argumentaba que el subsuelo soporta una masa y volumen de vida que rivalizan con los presentes en la superficie. Pero Gold fue más lejos al especular que la biosfera profunda subsiste gracias a los hidrocarburos que surgen del manto de la Tierra, una vasta fuente de energía que rellena continuamente los depósitos de petróleo. Esta sugerencia no está más aceptada ahora de lo que estuvo en su momento.

Conexión con el clima

Incluso cuando ayudan a reciclar los nutrientes, los microorganismos que hay bajo el suelo marino también pueden tener efecto sobre el clima del planeta. Las arqueas denominadas metanógenas producen metano como subproducto de su metabolismo. Colwell trabaja en la cuantificación de las tasas de esta producción de metano y afirma que a veces están por debajo del límite de detección⁸. Aunque el metano se acumula en escalas temporales geológicas y contribuye a la formación de “hidratos”, jaulas heladas de moléculas de agua que rodean al metano y que quedan encajados en los sedimentos marinos, se cree que la mayoría de los hidratos de metano se generan por procesos microbianos⁹.

Aparentemente, estos depósitos se han desestabilizado en varias ocasiones en el pasado de la Tierra, liberando suficiente metano (un gas invernadero mucho más potente que el CO₂) para calentar sustancialmente el planeta¹⁰. Cuando el planeta se calienta debido a la contaminación humana, los científicos cada vez están más preocupados acerca de la posible rotura de los hidratos de metano que están atrapados en el interior de la tundra del Ártico en deshielo y los sedimentos marinos poco profundos.

Mientras que la inmensa mayoría de microorganismos de la biosfera profunda dependen de la materia orgánica residual para alimentarse, otros parecen conseguir el sustento a partir de una fuente inorgánica. D'Hondt está investigando si los microbios del subsuelo marino pueden obtener energía a partir del hidrógeno que se produce cuando, durante la descomposición radiactiva de elementos naturales como uranio, torio y potasio, las moléculas de agua se disocian en hidrógeno y oxígeno. El mismo proceso habría ocurrido en la Tierra primitiva hace más de 4.000 millones



Microfotografías de microorganismos procedentes de debajo del suelo marino en el Océano Pacífico (superior), de la corteza continental de Sudáfrica (central) y bajo el lecho marino del Ártico (punto verdes, inferior).

B. ORCUTT, K. EDWARDS

M. DAVIDSON, G. SOUTHAM

D. C. SMITH

ARCHIVOS DEL INSTITUTO OCEANOGRÁFICO WOODS HOLE



Este sándwich permaneció meses en el fondo del océano.

de años y “debe estar ocurriendo actualmente en Marte”, comenta D’Hondt. “Hemos encontrado algunos indicios de que en estos ecosistemas [subsuelo marino] se introduce tanta energía procedente de la disociación del agua como de la materia orgánica enterrada”. Aun así, D’Hondt opina que, hasta el momento, no está clara la identidad de cualquier microbio que se gane la vida de este modo.

En la biosfera terrestre, los microbios encontrados en la mina de oro de Sudáfrica a casi 3 kilómetros de profundidad tienen una forma similar de metabolismo. Subsisten gracias al sulfato y el hidrógeno producidos geológicamente, exentos de cualquier dependencia de la energía derivada del sol¹¹.

La Tierra primitiva

Los geomicrobiólogos que trabajan en Sudáfrica también han descrito el primer ecosistema que comprende una única especie bacteriana, *Candidatus Desulforudis audaxviator*, que pasa su vida en oscuridad extrema a 60 °C, a unos 2,8 kilómetros por debajo de la superficie de la Tierra¹². Estos microorganismos parecen obtener su energía reduciendo el sulfato que se forma indirectamente por la descomposición radiactiva del uranio y pueden extraer carbono y nitrógeno de las rocas circundantes.

Dylan Chivian, bioinformático del Laboratorio Nacional de Lawrence Berkeley, en California, y el primer autor del estudio, comenta que este ecosistema de una única especie “apunta a un modo de vida como el que posiblemente podría haber sido la Tierra primitiva”, antes de que la atmósfera contuviera tanto oxígeno.

Los microbios de las profundidades descubiertos en las minas se encuentran a veces en bolsillos de agua que han estado aislados durante millones de años, haciendo que los organismos que viven allí sean prácticamente fósiles. Las fracturas de las rocas se abren y cierran periódicamente debido a la deriva tectónica, atrapando el agua y los microbios dentro de lo que Barbara Sherwood Lollar, geoquímica de la Universidad de Toronto en Ontario, llama una “serie de cápsulas del tiempo”. “En estos sistemas hidrogeológicamente aislados muy ancestrales surgen toda clase de preguntas fascinantes sobre cuánto tiempo han permanecido

los microbios ahí, cómo han evolucionado y qué significa para nuestro conocimiento sobre los orígenes de la vida en el planeta”, nos comenta.

Puesto que los microbios que colonizan la biosfera profunda han dominado el arte de vivir marginados, la comunidad de astrobiólogos también se ha tomado mucho interés en ellos. Como dice Teske, “la limitación energética es, por supuesto, algo casi común en los hábitats extraterrestres”. Y añade que las reacciones metabólicas anaerobias que utilizan los microbios que habitan las profundidades son las mismas reacciones químicas que con más probabilidad apoyan la vida en otros planetas.

“Es fascinante que toda esta microbiología y estos procesos que se habían considerado pertenecientes a la esfera de la geología estén realmente sustentando una parte importante de la vida en la Tierra”, opina Jørgensen. “Es como descubrir un nuevo continente”.

Ese sentido de potencial es lo que motivó a Edwards y a sus colaboradores durante su reciente viaje a North Pond. En los últimos días de la expedición, el equipo mantenía un ritmo frenético recogiendo núcleos de fango y almacenándolos en refrigeradores para el regreso a casa. Se puede decir que esta expedición era una misión de reconocimiento, que permitirá establecer el escenario para futuras expediciones. Edwards planea volver en 2010 o 2011 a bordo del barco de perforación *JOIDES Resolution*, el cual puede perforar rocas y profundizar unos 500 metros dentro de la corteza. Una vez ahí, piensan instalar un observatorio CORK que examinará el submundo intraterrestre y controlará ese entorno durante una década. Edwards espera que esta y otras misiones finalmente arrojen luz sobre la oscura y profunda biosfera y los límites más bajos de la propia vida. ■

Amanda Leigh Mascarelli es una escritora científica autónoma de Denver Denver, Colorado.

1. ZoBell, C. E. & Morita, R. Y. *Deep-Sea Res.* **3**, 66-73 (1955).
2. Parkes, R. J. et al. *Nature* **371**, 410-413 (1994).
3. Schippers, A. et al. *Nature* **433**, 861-864 (2005).
4. Roussel, E. G. et al. *Science* **320**, 1046 (2008).
5. Whitman, W. B. Coleman, D. C. & Wiebe, W. J. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **95**, 6578-6583 (1998).
6. Phelps, T. J., Murphy, E. M., Pfiffner, S. M. & White, D. C. *Microb. Ecol.* **28**, 335-349 (1994).
7. Gold, T. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **89**, 6045-6049 (1992).
8. Colwell, F. S. et al. *Appl. Environ. Microbiol.* **74**, 3444-3452 (2008).
9. Kvenvolden, K. A. & Lorenson, T. D. *Geophys. Mono.* **124**, 3-18 (2001).
10. Kennett, J. P., Cannariato, K. G., Hendy, I. L. & Behl, R. J. *Methane Hydrates in Quaternary Climate Change: The Clathrate Gun Hypothesis* (American Geophysical Union, 2002).
11. Lin, L. et al. *Science* **314**, 479-482 (2006).
12. Chivian, D. et al. *Science* **322**, 275-278 (2008).
13. Wymore, R. A. et al. *Bioremed. J.* **11**, 125-139 (2007).
14. Inagaki, F. et al. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **103**, 14164-14169 (2006).

Aportación de la vida subterránea a la minería

Los microorganismos que viven muy por debajo de la superficie de la Tierra poseen algunas características inusuales que el hombre espera explotar. El Gobierno de Sudáfrica, por ejemplo, lanzó un programa en 2007 para explorar las posibles aplicaciones industriales de los microorganismos y productos de la biosfera profunda. Como comenta Esta van Heerden, bioquímica de la University of the Free State de Bloemfontein, Sudáfrica, actualmente se están evaluando cuatro productos para el mercado.

Las enzimas y las sustancias antimicrobianas y antivirales aisladas a partir de los microorganismos del subsuelo son prometedoras para la industria de la biotecnología. Una de estas enzimas detoxifica de forma natural un ambiente carcinógeno consecuencia de la explotación minera del cromo hexavalente. Además, algunos microbios producen enzimas que pueden depositar metales como oro, plata y platino en forma de nanopartículas. Según Van Heerden, estas nanopartículas poseen propiedades ópticas y magnéticas únicas que pueden ser útiles para la administración de fármacos y otras aplicaciones.

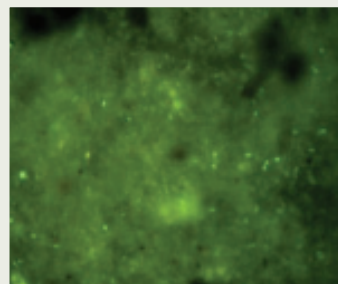
Rick Colwell, geomicrobiólogo de la Universidad del Estado de Oregón en Corvallis, y sus colaboradores están investigando el potencial de los microorganismos de la biosfera profunda para limpiar contaminantes

ambientales como el tricloroetano, un solvente clorado que se filtró en un acuífero del sudeste de Idaho como consecuencia de los residuos industriales. Una comunidad de microorganismos presentes de forma natural en el acuífero basáltico utiliza el metano del subsuelo como fuente de energía y cometaboliza el contaminante, limpiando de este modo el agua¹³. Colwell espera que estos microbios y otras comunidades naturales del acuífero que metabolizan compuestos orgánicos, reduzcan los costes de limpieza unos 7 millones de dólares en las próximas décadas.

Algunas comunidades microbianas de las profundidades podrían incluso ayudar al hombre a afrontar el problema del cambio climático. En una región volcánicamente activa próxima a Taiwán, existe un lago peculiar de dióxido de carbono líquido bajo un lecho de sedimentos en las profundidades marinas, consecuencia de las presiones extremas a 1.380 metros bajo la superficie del mar. Fumio Inagaki, de la Agencia Japonesa de Ciencia y Tecnología Marina y Terrestre en Kochi, y sus colaboradores han encontrado una comunidad dominante de microbios anaerobios que metabolizan metano y azufre y asimilan el CO₂ del entorno¹⁴. Inagaki comenta que "esta comunidad es un perfecto laboratorio natural para estudiar el potencial para la eliminación del CO₂ del subsuelo marino".

Colwell y uno de sus colaboradores, el geólogo marino Martin Fisk, están investigando las comunidades microbianas que existen en las rocas volcánicas profundas en el este del estado de Washington, donde se inyectó CO₂ como parte de un proyecto piloto de captura. Colwell quiere saber cómo responderán las comunidades microbianas al CO₂ inyectado y si pueden utilizarse como ayuda para controlar y verificar la presencia de CO₂ a los fines de un esquema de comercialización del carbono en el futuro.

A.L.M.



Rick Colwell (arriba) recoge microbios detoxificantes (derecha) de un acuífero de Idaho.

S. O'CONNELL

H. LEE/IDAHO NATL LAB.