

Proliferación o *floreCIMIENTO* de microalgas frente a las costas patagónicas argentinas, en el que posiblemente dominen los *cocolitóforos* (microalgas con estructuras de carbonato de calcio) y las *diatomeas* (microalgas con sílice). Fotografía tomada desde el satélite Aqua de la NASA el 21 de diciembre de 2010.

Pedro Flombaum y Federico Ibarbalz
Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)
Sergio Velasco Ayuso

El futuro de un mundo invisible de microorganismos

El cambio climático plantea el interrogante de cómo responderán los seres vivos a climas futuros. Se espera que los aumentos de temperatura tengan, por lo menos, tres consecuencias: (i) desplazamiento de especies de sitios cálidos a sitios fríos; (ii) modificaciones del tamaño de las poblaciones tanto de especies abundantes como raras, y (iii) cambios en la actividad de dichas especies, con la consiguiente modificación del papel que desempeñan en los procesos ecológicos.

Los microorganismos constituyen un grupo de especial interés en este contexto, ya que son particularmente sensibles a la temperatura, extraordinariamente abundantes y diversos, están distribuidos por todo el planeta y su actividad regula los ciclos de nutrientes, así como la concentración de oxígeno en los mares. Esta combinación de abundancia, diversidad, distribución y actividad

plantea un desafío serio a la hora de comprender qué efectos tendrá el cambio climático sobre ellos.

Hay dos caminos complementarios para estimar qué efectos tendrá el cambio climático sobre los microorganismos. Por un lado, existen modelos matemáticos basados en premisas teóricas que calculan su respuesta a características ambientales como temperatura, disponibilidad de nutrientes o precipitaciones, los que por lo general simplifican mucho la alta diversidad de especies y las interacciones biológicas propias del mundo real. Como alternativa, existen modelos estadísticos que se apoyan en observaciones de campo y tienen en cuenta tanto la diversidad de especies como las interacciones entre ellas, además de las condiciones ambientales; la creciente disponibilidad de datos y las nuevas herramientas de análisis son la base sobre la que se apoya esta aproximación. Ambos tipos de modelos se combinan con simulaciones

¿DE QUÉ SE TRATA?

Microorganismos de mar y tierra en el contexto del cambio climático

de climas futuros realizadas a partir de distintas hipótesis de emisión de gases de efecto invernadero. Así, se han calculado futuras abundancias y distribuciones de microorganismos en el océano y en el medio terrestre.

Cambios en la diversidad del plancton marino

Las proyecciones climáticas para finales del siglo XXI sugieren que habrá aumentos en la diversidad del plancton marino en zonas que suelen estar dominadas por unas pocas especies. El plancton (del griego *planktos*, errante) es una compleja comunidad de microorganismos que varía en tamaño, funcionamiento y forma de vida. Una gota de agua marina puede contener microorganismos cuyo tamaño varía nueve órdenes de magnitud (mil millones de veces), es decir, la misma diferencia que hay entre una bolita de juegos infantiles o canica y un estadio internacional de fútbol. Al mismo tiempo, ese tamaño está relacionado con la concentración de individuos: en un litro de agua de mar puede haber (enumerados en orden creciente de tamaño) billones de virus y bacterias, millones de células de protozoarios y cientos de animales milimétricos. Los microorganismos marinos son capaces de hacer fotosíntesis, fijar nitrógeno atmosférico y hasta liberar al medio moléculas de azufre que influyen en la formación de nubes. Por diferentes mecanismos, una fracción de su materia orgánica presente en los cuerpos de agua se hunde hasta alcanzar grandes profundidades, donde queda por largos períodos de tiempo. Le cabe desempeñar, por lo tanto, un papel central en el ciclo global del carbono.

Si bien se traslada pasivamente con las corrientes, el plancton presenta patrones globales de diversidad similares a los que se observan en comunidades terrestres, con un alto número de especies en las cercanías del ecuador, el cual disminuye gradualmente hacia los polos. Se trata de uno de los más conocidos patrones ecológicos de escala global, llamado *gradiente latitudinal de diversidad*. A pesar de que fueron planteadas numerosas hipótesis para explicarlo, no se cuenta en estos momentos con una teoría general que lo describa en su totalidad y permita hacer predicciones. Sin embargo, la temperatura media anual es una de las variables ambientales que mejor lo dilucida.

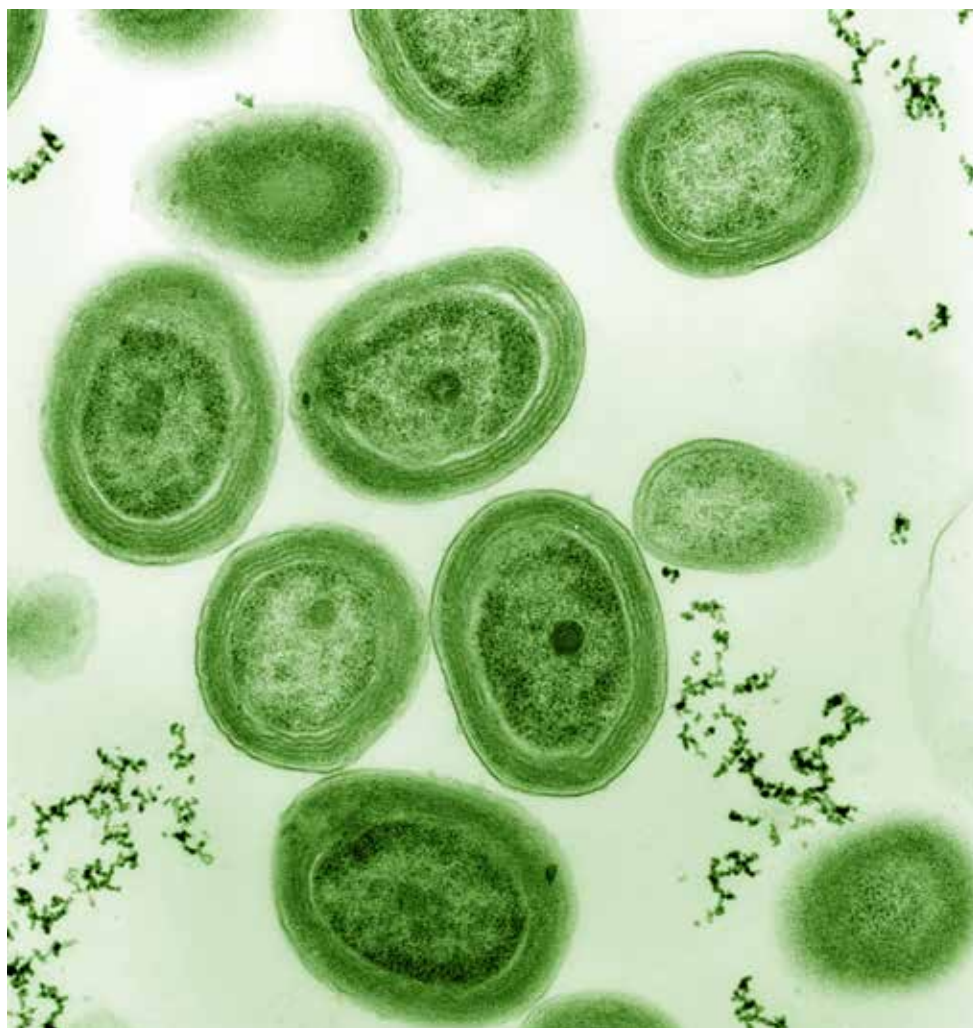
Las proyecciones climáticas para fin de siglo realizadas por múltiples laboratorios y unificadas en los informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas muestran un aumento de la temperatura de la superficie del océano y, como consecuencia, una mayor estratificación de la columna de

agua. Esa estratificación es sinónimo de menor mezcla vertical, lo que trae aparejado un menor transporte de nutrientes desde capas profundas a la superficie. Tales condiciones se asemejan a las de las aguas tropicales, en las que prospera una gran diversidad de microorganismos, aunque en muy bajas densidades. En consecuencia, se espera que los microorganismos del plancton adaptados a condiciones más frías y estacionales se vean reemplazados por otros que provengan de regiones más cálidas, o bien por grupos muy minoritarios preexistentes que podrían verse en un medio que les resulta ventajoso.

Las mencionadas proyecciones fueron realizadas con datos de secuenciación de ADN de toda la comunidad planctónica, más una extensa caracterización del hábitat del cual fueron tomadas las muestras mediante información sobre temperatura, producción primaria, concentración de nutrientes, etcétera. Recuperar de una muestra de agua de océano ADN que represente a toda la comunidad requiere filtrar varios litros de agua de forma tal que queden retenidas suficientes células o individuos de tamaño micrométrico (milésimas de milímetro). Luego es necesario extraer el ADN de todas las células y prepararlo para la secuenciación. Los procedimientos actuales de secuenciación generan billones o *gigabytes* de datos, que debidamente procesados y organizados permiten clasificar a los microorganismos y conocer su potencial metabólico. En particular, el muestreo al que estamos refiriendo cubrió una escala espacial sin precedentes, pues incluyó todas las cuencas oceánicas del mundo. Ello permitió obtener una visión de cambios anticipados en la composición de la comunidad del plancton y en sus patrones de diversidad global.

Cambios en la abundancia del fitoplancton marino

El fitoplancton es aquel grupo de organismos del plancton que tiene la capacidad de realizar fotosíntesis, el mismo proceso que realizan las plantas, que está íntimamente ligado al ciclo global del carbono. Si nos enfocamos en regiones tropicales del océano, los grupos actualmente dominantes del fitoplancton serán más abundantes hacia finales del presente siglo. Las aguas tropicales están dominadas por el picofitoplancton, la fracción del fitoplancton compuesta por algas unicelulares y cianobacterias cuyos individuos tienen el menor tamaño celular, pues sus medidas oscilan por debajo de los dos micrómetros. Desde finales de la década de 1980 se han realizado numerosas expediciones oceanográficas para conocer la distribución de este grupo, un dato clave, ya que da una idea de cómo las condiciones del ambiente



Prochlorococcus marinus, un organismo del picofitoplancton que mide alrededor de 0,6 micrómetros (milésimas de milímetro). Imagen coloreada de microscopía electrónica tomada por Luke Thompson y Nikki Watson, Instituto de Tecnología de Massachusetts, Wikimedia Commons.

regulan sus poblaciones, o de cuán productivos pueden ser los ecosistemas marinos.

Para obtener este dato se recurrió a un ingenioso método de conteo, creado para fines biomédicos, la *citometría de flujo* (*flow cytometry*). Consiste en pasar células suspendidas en el agua por un tubo capilar transparente que es iluminado por un láser, lo que revela el tamaño de las células, si tienen capacidad de hacer fotosíntesis y el número de ellas por unidad de volumen. Se han acumulado numerosas observaciones obtenidas por embarcaciones de investigación que recorren los océanos equipados con un citómetro de flujo.

Pero pasar de muestreos individuales a análisis globales requiere un paso adicional. Usando más de 30.000 conteos celulares por citómetro de flujo provenientes de todos los océanos del mundo se desarrollaron *modelos de nicho* —nombre de un tipo de modelo estadístico— con los que se buscó predecir la abundancia mundial del picofitoplancton. Entre todas las variables ambientales, la temperatura resultó aquella que mejor explica la concentración de este en el agua. En otras palabras, el

conjunto de las observaciones reveló una correlación directa muy fuerte entre la abundancia de picofitoplancton y la temperatura. También puso de manifiesto diferencias entre los principales componentes del picofitoplancton. Así, *Prochlorococcus*, la cianobacteria más pequeña, resultó la más sensible a la temperatura y la más abundante numéricamente en aguas cálidas, mientras que *Synechococcus*, otra cianobacteria, y el *fitoplancton picoeucariota* —integrado por las más pequeñas algas con núcleo celular— aumentaron su abundancia a partir de los 20°C, pero en menor medida que *Prochlorococcus*. Es decir, lo que parece un grupo homogéneo en tamaño y función, reacciona en realidad de manera diferente ante cambios de variables ambientales como la temperatura.

Para obtener las proyecciones del fitoplancton para el año 2100, se combinaron los modelos de nicho con los modelos climáticos y se supuso la continuidad de la alta emisión actual de gases de efecto invernadero. El análisis sugirió que, con respecto a la situación actual, podría haber un aumento de hasta 60% en la abundancia del picofitoplancton, aunque los distintos componentes de



Trozo de costra biológica del suelo recogida en el desierto de Sonora, en el estado norteamericano de Arizona. Se aprecian en color negrozco las cianobacterias, y en blanco un líquen.

este grupo diferirían en su respuesta. *Prochlorococcus* experimentaría mayores aumentos, seguido por *Synechococcus*. En cambio, las algas picoeucariotas mostrarían cambios en su distribución, pues se desplazarían hacia los polos, pero no tendrían un aumento significativo de abundancia. Por lo tanto, a pesar de que se proyectan cambios en todos los grupos, la respuesta dentro del picofitoplancton no se daría de forma homogénea, lo que resalta la complejidad ecológica de este grupo microbiano.

Cambios en costras biológicas terrestres

En los ecosistemas terrestres, los microorganismos del suelo representan una de las entidades biológicas más abundantes y diversas del planeta. En un gramo de suelo podemos encontrar de miles a decenas de miles de especies diferentes. En zonas áridas, las cianobacterias y las bacterias no fotosintéticas, en asociación con líquenes, musgos, algas unicelulares y hongos, entre otros, pueden formar un mantillo conocido como *costra biológica del suelo*, algo así como una piel biológica, que podemos encontrar tanto en desiertos fríos como en zonas más húmedas y cálidas. Siempre que la vegetación no impida el paso de la luz, la costra biológica se extiende sobre la capa más superficial del suelo como una alfombra. Una red pegajosa, producto de la actividad biológica, une a las partículas del suelo entre ellas, que quedan atrapadas en las costras biológicas. De esta forma, esta comunidad de microorganismos y organismos asociados estabiliza y protege el suelo de la erosión por viento y agua. Tiene además un cometido crucial en el control del ciclo hidrológico, algo muy importante en zonas áridas y semiá-

ridas. Pero seguramente la función ecológica central de las costras biológicas del suelo es la de agente fertilizador, que cumplen gracias a la actividad de bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico.

Mientras la producción primaria neta de las costras biológicas a partir del CO_2 atmosférico, representa el 15% del total de la extracción de ese gas del aire por los ecosistemas terrestres, su contribución a la fijación del nitrógeno supera el 50% y, probablemente, se acerque al 80%, algo logrado cubriendo una superficie de solo 12% del total de la de los ecosistemas terrestres. Estas estimaciones recientes –de las que informa un artículo publicado en *Nature Geoscience* incluido entre las lecturas sugeridas– fueron el fruto de recopilar datos de más de 900 puntos de muestreo distribuidos en todo el mundo, producto de unos 550 trabajos de investigación. En combinación con un abanico de variables ambientales relacionadas con la temperatura, la precipitación, los minerales y el uso del suelo, tal conjunto de datos resultó en un modelo estadístico que permitió, además, estimar la cobertura por costras biológicas en áreas que no habían sido estudiadas antes.

Las funciones de las costras biológicas en la fijación de carbono y nitrógeno son fundamentales en zonas áridas, donde la cantidad de agua que cae en forma de lluvia o nieve es menor que la pérdida por evapotranspiración. En esos territorios, que cubren casi la mitad de la superficie del planeta, vive un tercio de la población humana y se han establecido muchas civilizaciones. Las proyecciones de cambio climático llevan a anticipar que allí el suelo estará un 30% menos cubierto que hoy por las costras biológicas, y que consecuentemente mermará la incorporación a él de carbono y de nitrógeno (el 40% para el nitrógeno y menos para el carbono). Ello tendría un efecto directo sobre la vegetación, ya que las costras biológicas aportan al suelo buena parte de las formas inorgánicas de nitrógeno, que sustentan el establecimiento y el desarrollo de las plantas vasculares. Y la falta de un buen desarrollo del forraje afectaría al ganado, principal motor económico de las poblaciones humanas de esos territorios áridos y semiáridos.


Conclusiones

El aumento de la temperatura tendrá consecuencias sobre los microorganismos y esto, potencialmente, puede afectar a los seres humanos de dos maneras. La reducción de la fertilidad de los suelos en zonas áridas podría perjudicar la producción agropecuaria; la expansión de aguas oceánicas de baja productividad deterioraría las pesquerías. Ambos aspectos son relevantes para la Argentina.

El 60% de los ecosistemas terrestres argentinos está en zonas áridas o semiáridas, en las cuales las costras biológicas desempeñan un papel ecológico central en mantener la estabilidad y la fertilidad del suelo. En las regiones no áridas del país, como la pampeana, o en aquellas de bosques y selvas, los microorganismos del suelo tienen asimismo una función importante, principalmente en cuanto a la fertilidad y la emisión de gases de efecto invernadero. Las consecuencias que el cambio climático provoque sobre todas estas comunidades microbianas requieren ser estudiadas para generar planes que permitan adaptarnos a situaciones futuras.

Algo similar ocurre con los ecosistemas marinos. El mar territorial argentino es muy extenso, variado, de alta actividad biológica y de gran importancia económica. Cuál será el efecto del cambio climático sobre los microorganismos de este ecosistema constituye una impor-

tante pregunta que se procura contestar, y para hacerlo las campañas oceanográficas pueden constituir un instrumento decisivo. En conjunto, las herramientas moleculares y el modelado permitirán identificar la vulnerabilidad y la resiliencia del sistema, región por región.

La estimación de las consecuencias del cambio climático permite reducir las incertidumbres acerca del futuro. Estas incluyen, entre otras, la magnitud de las emisiones asociadas con actividades humanas, la respuesta del sistema climático a ellas, la respuesta de la comunidad de seres vivos o biota y las interacciones entre todos estos componentes. Las investigaciones comentadas en este artículo apuntan a reducir una parte de la incertidumbre asociada con la respuesta de la biota. Comprender mejor los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas ayudará a tomar decisiones para adaptarse y para mejorar nuestra actual organización socioeconómica. 

LECTURAS SUGERIDAS

CAMILLONI I, 2008, 'Cambio climático', *CIENCIA HOY*, 18, 103: 43-49.

FLOMBAUM P et al., 2020, 'Global picophytoplankton niche partitioning predicts overall positive response to ocean warming', *Nature Geoscience*, 13: 116-120.

IBARBALZ FM et al., 2019, 'Global trends in marine plankton diversity across kingdoms of life', *Cell*, 179, 5: 1084-1097.

RODRÍGUEZ-CABALLERO E et al., 2018, 'Dryland photoautotrophic soil surface communities endangered by global change', *Nature Geoscience*, 11: 185-189.

VELASCO AYUSO S et al., 2020, 'Grazing pressure interacts with aridity to determine the development and diversity of biological soil crusts in Patagonian rangelands', *Land Degradation and Development*. DOI 10.1002/ldr.3465



Pedro Flombaum

Doctor (PhD) en ciencias biológicas, Brown University, Providence RI.
Investigador adjunto en el CIMA, UBA-Conicet.
Profesor adjunto, FCEN, UBA.
pflombaum@cima.fcen.uba.ar



Federico Ibarbalz

Doctor en ciencias biológicas, UBA.
Becario posdoctoral en el CIMA, UBA-Conicet.
federico.ibarbalz@cima.fcen.uba.ar



Sergio Velasco Ayuso

Doctor en ciencias biológicas, Universidad Autónoma de Madrid.
Gerente de laboratorio de la empresa biotecnológica Kernel Mycofood.
sergio.sva@gmail.com