

Romeo Saldívar Lucio, Salvador E. Lluch Cota y Cinthya Castro Iglesias



Impactos de la ingeniería climática

Se expone un caso de generación de conocimiento nuevo en la ecología frente al surgimiento de propuestas de remediación climática a escala global, conocidas como técnicas de ingeniería climática. Un grupo de ecólogos realizó un ejercicio estructurado llamado escaneo de impactos, con el objetivo de definir cuál es el conocimiento inexistente y cuáles son las líneas de investigación que permitirán elaborar opiniones informadas en el futuro. Una verdadera sociedad del conocimiento exige el dominio del “saber conocer” frente a problemas nacientes.

Estamos acostumbrados a escuchar de las tendencias de la moda; de la ropa, los artículos o los lugares que están de moda. Pero pocas veces nos detenemos a pensar cuando los discursos se ponen de moda. Uno de estos discursos es que la sociedad contemporánea es una “sociedad del conocimiento”; y, como está de moda, entonces casi todos lo asumimos como algo cierto. Pero reflexionemos por unos segundos: ¿sabemos siquiera qué es el conocimiento y cómo se construye?, ¿cómo se combinan los saberes existentes para la conformación de conocimiento nuevo? Entonces, ¿cómo podemos ser una sociedad del conocimiento si no sabemos cómo se construye el conocimiento?

Es importante destacar que el concepto *sociedad del conocimiento* está anclado a los progresos tecnológicos y visiones fundamentalmente “economicistas”. Por otro lado, y en línea con algunos de los conceptos teóricos propuestos por la UNESCO, una sociedad del conocimiento busca su definición desde enfoques y perspectivas sociales, culturales y políticas con horizontes mucho más amplios. Pero en las sociedades de la información, ante la percepción de que es posible “adquirir saberes” a través de la copiosa y desmesurada cantidad de datos, que viajan cada vez con mayor velocidad, se omite con facilidad la reflexión sobre la capacidad de interiorización y apropiación social del conocimiento.

En este marco de ideas, podemos decir que el conocimiento permite tomar decisiones y genera oportunidades de intervención respecto a algún problema o



a circunstancias particulares. Pongamos un ejemplo: entre los años 2012 y 2013 una iniciativa conjunta de las universidades de Cambridge y Oxford y el Instituto de Estudios Avanzados en Sustentabilidad (IASS) convocó a un grupo de 34 ecólogos de todo el mundo con el reto de generar conocimiento nuevo para identificar las prioridades y preguntas de investigación pertinentes que en el futuro próximo y lejano permitan generar opiniones informadas, respecto a los impactos potenciales de las diferentes técnicas de ingeniería climática sobre la biodiversidad y los ecosistemas. El ejercicio permitió identificar las fronteras del conocimiento y aspectos clave de las relaciones emergentes entre la ecología contemporánea y la ingeniería climática.

Alcalinidad

Medida de la capacidad de una sustancia para neutralizar ácidos. Se debe a la presencia de ciertos compuestos cuya alcalinidad puede ser débil o fuerte, es decir, con la capacidad de neutralizar cantidades pequeñas o grandes de ácidos, respectivamente. Entre los compuestos que más aportan a la alcalinidad de una sustancia están los minerales carbonatados y los silicatos.

La ingeniería climática

Ante la creciente evidencia de que las actividades humanas han modificado el clima de la Tierra, ha surgido una cascada de propuestas para contrarrestar el calentamiento global debido a la acumulación de gases de efecto invernadero. Al grupo de propuestas que persigue semejante remediación planetaria se le conoce como *geoingeniería* o *ingeniería climática*. En otras palabras, la ingeniería climática busca combinar los saberes existentes para generar técnicas de intervención a escalas lo suficientemente grandes como para modificar (“favorablemente”) el sistema climático de nuestro planeta.

Las técnicas de ingeniería climática que se han propuesto van desde las muy sencillas, como el aumento de la **alcalinidad** del suelo, hasta las muy costosas y que en la actualidad no se pueden llevar a cabo por la falta de tecnología adecuada; tal es el caso de la instalación de reflectores en el espacio para rechazar fracciones de luz solar lejos de la Tierra. Las técnicas de ingeniería climática se dividen en dos grandes grupos y algunos ejemplos de ellas son:

1. *Técnicas de remoción de dióxido de carbono (CO₂)*
 - Fertilización de 30% de la superficie del océano mediante la dispersión de polvo de hierro en zonas de baja productividad.

- Instalación masiva de estructuras para la captura de aire y la remoción de CO₂ para luego transferirlo a algún reservorio de largo plazo, oceánico o geológico.
 - Quema de biomasa en condiciones de bajo oxígeno (pirólisis) para formar productos sólidos similares al carbón. Posteriormente se entierra y puede actuar como un reservorio de carbono.
2. *Técnicas de gestión de la radiación solar*
 - Incremento de la capacidad reflectora de las nubes sobre el mar mediante la dispersión de partículas que actúan como núcleos de condensación de nubes.
 - Inyección de aerosoles en la estratosfera baja para formar partículas que dispersan la radiación solar.
 - Reemplazo de pastizales y matorrales por plantas seleccionadas por la alta capacidad de su superficie para reflejar la luz solar.

El reto de los ecólogos

La tarea para el grupo de ecólogos marinos y terrestres convocados fue preguntarse ¿cuáles serían los impactos sobre la biodiversidad y los ecosistemas en caso de aplicarse las técnicas de ingeniería climática?, ¿cómo valorar los riesgos?, ¿cuáles son las técnicas de ingeniería climática más factibles y cuáles son las más peligrosas?, ¿cómo establecer las bases de conocimiento para identificar la vulnerabilidad de los ecosistemas y la biodiversidad frente a los efectos potenciales de la ingeniería climática?

Dos campos de conocimiento se encuentran: la naciente ingeniería climática y la ecología que, aunque en un estado mayor de madurez, se enfrenta al enorme reto de generar conocimiento nuevo. Los ecólogos decidieron empezar con un método conocido como *escaneo de horizonte* y que, al adaptarlo a las circunstancias del problema, optaron por nombrar *escaneo de impactos*. La esencia de este método es identificar y evaluar temas que podrían resultar de notable seriedad en el futuro, aunque en el presente sólo hayan capturado escasa atención (en este caso, la ingeniería climática). La intención del escaneo de impactos es examinar los posibles desarrollos y pro-



bables consecuencias (por ejemplo, perturbaciones en la biodiversidad y los ecosistemas).

La experiencia grupal que los propios ecólogos siguieron de manera estructurada a través del escaneo de impactos se puede resumir en diez pasos:

1. Realizaron búsquedas de expertos (ecólogos terrestres y marinos).
2. Elaboraron una revisión de la literatura científica para identificar efectos potenciales de las técnicas de ingeniería climática.
3. Aplicaron una primera ronda de encuestas en la que cada experto calificó en un rango de 0 a 100 los efectos potenciales de cada técnica de ingeniería climática sobre la biodiversidad y los ecosistemas.
4. Recopilaron los resultados de todos los expertos y calificaron nuevamente (a partir del conglomerado) la importancia percibida de los efectos potenciales de cada técnica de ingeniería climática.
5. Cada experto sugirió preguntas de investigación prioritarias.
6. Plantearon a los ecólogos expertos un escenario de calentamiento global y de aplicación de las técnicas a una escala climáticamente significativa.
7. Enviaron los resultados a los expertos y posteriormente realizaron un taller (en mayo de 2013) donde compartieron y discutieron las razones por

las que habían asignado sus calificaciones. Basados en la discusión, cada experto volvió a calificar (de 0 a 100) los efectos potenciales sobre los ecosistemas y la biodiversidad.

8. Al final del taller, el grupo revisó y refinó las preguntas de investigación que habían sido sugeridas de manera individual.
9. De las nuevas calificaciones que resultaron del taller, los ecólogos calcularon un índice de prioridad (transversal a todas las técnicas de ingeniería climática). El índice se calculó con la **mediana** (una medida estadística similar al promedio) de las calificaciones de importancia del efecto potencial y del grado de comprensión de dicho efecto:

$$\text{Prioridad} = (\text{Grado de importancia} + [100 - \text{Grado de comprensión}]) * 0.5$$
10. Con el índice de prioridad obtuvieron una clasificación de los cambios ambientales; el cambio es de mayor prioridad si tiene más efectos potenciales importantes sobre la biodiversidad y los ecosistemas, o si existe poca comprensión de sus efectos.

Del encuentro entre la ecología y la ingeniería climática emergen nuevas relaciones y de ellas, nuevas preguntas de investigación. De hecho, se han rea-

Mediana

En estadística, es una medida de tendencia central, típicamente definida como el valor intermedio (que ocupa la posición central) en un conjunto ordenado de datos. Por lo tanto, en el conjunto de datos debe haber tantos valores mayores a la mediana como el número de valores inferiores a ella.



lizado y se siguen realizando ejercicios similares alrededor de temas como los aspectos éticos y religiosos de la ingeniería climática o una supuesta “necesidad” de gobernanza global (www.eutrace.org). La sistematización de este tipo de experiencias, tanto en ámbitos científicos como fuera de ellos, nos permitiría aspirar a conformar una verdadera sociedad del conocimiento: aprender a conocer.

Albedo

Cantidad de luz que refleja un objeto. En nuestro planeta, por ejemplo, el albedo varía entre regiones: los océanos tienen un bajo albedo; es decir, una baja capacidad para reflejar los rayos del sol, mientras que las zonas nevadas o los desiertos tienen un albedo muy elevado, dado que reflejan una gran proporción de la luz solar que reciben. El albedo es un componente fundamental del sistema climático de la Tierra.

Resultados

Del aprender a conocer existen valiosas aportaciones de las ciencias sociales, entre ellas el método usado por el grupo de ecólogos expertos. La estructura formalizada, el conocimiento de los investigadores, la crítica y la autocrítica son los elementos que distinguen al método de *escaneo de impactos* de un mero intercambio de opiniones. La ciencia tiene sus formas particulares de obtener conocimiento; quizá las más distintivas, aunque no las únicas, son: 1) la observación detallada y disciplinada, 2) la actitud crítica, 3) el apego a la metodología y 4) la comunicación de los resultados. Pero la ciencia es una tradición muy reciente en relación con la historia de la humanidad y comparte su función generadora con otros tipos de conocimiento, como el intuitivo, el empírico y el filosófico.

Entre los principales resultados que arrojó el escaneo de impactos de esta iniciativa (el cual incluyó encuestas, propuestas, discusiones y evaluaciones), el grupo identificó siete cambios potenciales en la biodiversidad y los ecosistemas como los de mayor riesgo y complejidad. Todos estos cambios estuvieron asociados con las técnicas de gestión de la radiación solar, las cuales están dirigidas a restringir la entrada de radiación de onda corta con el fin de reducir la temperatura superficial promedio a escala global; sin embargo, éstas producirían cambios en las condiciones climáticas regionales cuyos efectos ecológicos son complejos y difícilmente predecibles. Los cambios en los patrones de temperatura y precipitación fueron reconocidos por los expertos como altamente relevantes para la biodiversidad y los ecosistemas, dado que son factores determinantes de los cambios **fenológicos** (estacionales), así como de la

historia de vida de muchas especies, sus adaptaciones fisiológicas, interacciones y patrones de distribución.

En los puntos críticos señalados frecuentemente por los expertos, se encontraron los cambios potenciales en los ecosistemas marinos, entre ellos: la modificación de la circulación oceánica; las alteraciones a la relación temperatura-acidificación y su impacto sobre organismos fijadores de calcio, como los corales; los cambios en los patrones de producción primaria en respuesta a la modulación de la luz entrante; la transformación de los patrones de temperatura y la explosión de nutrientes en las zonas de baja productividad natural. El grupo de investigadores identificó que entre las técnicas de remoción de CO₂, el almacenamiento de biomasa en el océano profundo podría resultar en alteraciones significativas de gran escala y larga duración para los hábitats aun escasamente intervenidos, ya que se promovería el desarrollo de zonas de bajo oxígeno y altas concentraciones de nutrientes debido a la descomposición orgánica masiva.

Algunas de las técnicas de ingeniería climática contemplan la instalación a gran escala de estructuras para, entre otras cosas, mejorar la capacidad reflectora (**albedo**) del terreno o remover el CO₂ directamente del aire. El problema potencial que los ecólogos distinguen detrás de este tipo de técnicas es que, para que lleguen a ser climáticamente significativas, requieren la destrucción o alteración de grandes extensiones de hábitats terrestres; con ello



Fenología

Estudio de los fenómenos biológicos en respuesta a los cambios físicos del ambiente, particularmente en el ciclo estacional.

se pondría en riesgo la composición de comunidades ecológicas únicas, así como la presencia de especies sensibles y especies endémicas.

Por último, la modificación de las propiedades biogeoquímicas del suelo (pH, composición y estructura) mediante la adición de rocas alcalinas pulverizadas es una técnica que busca potencializar la capacidad del suelo para almacenar CO₂. Los ecólogos estuvieron de acuerdo en que la alteración de las propiedades del suelo representa una amenaza para la biodiversidad y la actividad de los organismos que ahí habitan. Las modificaciones al suelo tendrían asociadas una mayor disponibilidad de nutrientes, lo que potencialmente alteraría la composición y productividad de las comunidades de plantas. Adicionalmente existen cambios poco predecibles que resultan de las combinaciones de parámetros alterados, entre ellos la temperatura, la estructura física y la biogeoquímica.

Los temas identificados por el grupo como los más importantes muestran los tipos de impactos ecológicos que son particularmente críticos para ser considerados. Si continúa el interés sobre la ingeniería climática, se deben tomar en cuenta las consecuencias sobre la biodiversidad y los ecosistemas, de modo que se evite enfrentar consecuencias involuntarias. De ahí la relevancia de construir conocimiento nuevo y desarrollar los fundamentos que guíen las opiniones técnicas de los ecólogos en el futuro. En este sentido, resultaría de un valor importante

promover nuevos procesos de consulta a expertos y escaneo de impactos para identificar temas emergentes en las fronteras de la ingeniería climática y otros campos de conocimiento (por ejemplo, ética, derecho y geopolítica).

■ ■ ■ Conclusiones

■ Más allá de los aspectos ecológicos, la ingeniería climática yace en la incertidumbre y la controversia; es fuente de serias preocupaciones respecto a los impactos potenciales de sus diferentes técnicas, particularmente en los ámbitos social, económico y geopolítico (Ribeiro, 2007; Delgado-Ramos, 2012). Desde el año 2010 existe en Naciones Unidas una moratoria contra la ingeniería climática, mientras que en el caso específico de la ingeniería climática marina comercial ésta fue prohibida en el año 2013 durante la Sesión del Protocolo de Londres de Naciones Unidas, donde también algunos delegados lograron una excepción (limitada y condicionada) para llevar a cabo experimentos de este tipo de ingeniería.

En resumen, el impulso a la ingeniería climática ha continuado y busca sus nichos de propaganda, legitimidad y legalidad; por lo tanto, demanda la construcción de conocimiento nuevo en múltiples dimensiones, considerando la afortunada o infortunada (pero conveniente) imposibilidad de experimentación y documentación del grado y extensión





de los impactos de las diferentes técnicas. Tal como diversos autores han mencionado, es necesario abrir el debate y hacer del dominio público la ingeniería climática y sus implicaciones: callar y enterrar la iniciativa sería más peligroso que debatir abiertamente; es necesaria la construcción de diálogo entre saberes.

Así como el grupo de ecólogos expertos consiguió identificar aspectos clave de las relaciones emergentes entre la ingeniería climática y la ecología, el escaneo de impactos (o métodos similares) representa una herramienta útil para otros campos de conocimiento durante su proceso de construcción. La aplicación de la citada herramienta metodológica permitiría identificar y priorizar, desde diferentes ángulos, las necesidades de conocimiento nuevo frente a problemas poco atendidos o de reciente aparición.

Romeo Saldívar Lucio realizó sus estudios de doctorado en Ciencias Marinas en el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional. Ha colaborado en diversos proyectos de investigación en temas como ecología marina, pesquerías y cambio climático. Se ha interesado en entender los patrones climáticos históricos y su utilidad para aplicarlos en modelos estadísticos que expliquen la relación del clima con atributos biológicos y ecológicos de organismos marinos.
romeo26_1979@yahoo.com

Salvador Lluch Cota es biólogo marino por la Universidad Autónoma de Baja California Sur, estudió la maestría en Ciencias en el Instituto Politécnico Nacional y el doctorado en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., donde actualmente es investigador titular. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores, nivel III. Su trabajo de investigación abarca temas de ecología marina, pesquerías, variabilidad ambiental y cambio climático. Es miembro regular de la Academia Mexicana de Ciencias.
slluch@conacyt.mx

Cintha Castro Iglesias es licenciada en Historia con estudios de maestría en Historia Regional por la Universidad Autónoma de Baja California Sur. Comunicadora desde 1986 en áreas de difusión cultural y divulgación científica. Actualmente es jefa del Departamento de Extensión y Divulgación Científica y coordinadora del Grupo de Comunicación de ANUIES Noroeste. Es directora y entrevistadora del programa de radio *110 grados* para el Sistema de Centros Públicos Conacyt, y conductora del programa *Tiempo de ciencia* de CIBNOR.
ccastro@cibnor.mx

Lecturas recomendadas

- McCormack, C. G. *et al.* (2016), "Key impacts of climate engineering on biodiversity and ecosystems, with priorities for future research", *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 13 (2-4): 103-128.
- Delgado-Ramos, G. C. (2012), "Geoingeniería, apuesta incierta frente al cambio climático", *Estudios Sociales*, XX (40): 212-236.
- De la Lama García, A. (2014), "La investigación científica y sus reglas de juego", *Ciencias*, 113-114:118-131.
- European Transdisciplinary Assessment of Climate Engineering. www.eutrace.org. Consultada en junio de 2016.
- García-García, E. (2009), "Aprendizaje y construcción del conocimiento. Capítulo 1", en: López Alonso, C. y Matesanz del Barrio, M. (eds), *Las plataformas de aprendizaje. Del mito a la realidad*, Madrid: Biblioteca Nueva, 21-24 pp.
- Ribeiro, S. (2007, 3 de febrero), "Manipulando el clima", *La Jornada*.
- Ribeiro, S. (2007, 21 de febrero), "Manipulando el clima", *La Jornada*.
- UNESCO (2005), *Hacia las sociedades del conocimiento*, Francia: UNESCO. Disponible en: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001419/141908s.pdf>>, consultada el 20 de junio de 2016.
- Universidad de Barcelona (2005, 21 de abril), *Sociedad de la información/Sociedad del conocimiento*. Disponible en: <<http://www.ub.edu/prometheus21/articulos/obsiberprome/socinfsocco>>, consultada el 18 junio de 2016.