

Manejo de la Radiación Solar

Geoingeniería y cambio climático: implicaciones para América Latina

En breve

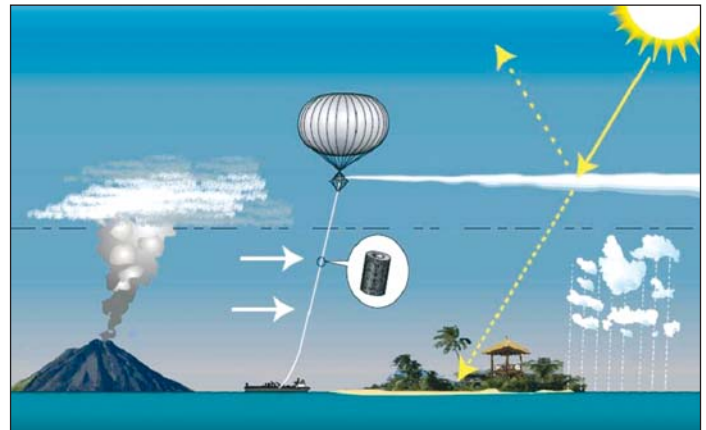
Este informe explora las consecuencias potenciales de implementar el Manejo de Radiación Solar (MRS) –una forma de geoingeniería que están considerando algunos gobiernos para contrarrestar el cambio climático. MRS se refiere a un conjunto de tecnologías diseñadas para reducir la luz solar y con ello, disminuir la temperatura. En la actualidad estas tecnologías son sólo teóricas, pero mediante modelos computacionales, grupos científicos han podido deducir algunos de sus impactos potenciales. Han encontrado que mientras algunos países de las regiones templadas tendrían una mayor probabilidad de beneficiarse con MRS, otras regiones podrían verse adversamente afectadas.

Este informe considera los impactos climáticos para América Latina, en donde los modelos sugieren cambios mayores en los patrones de precipitación que podrían exacerbar las condiciones secas e incrementar la posibilidad de sequías en amplias regiones.

Este resumen considera los impactos climáticos para América Latina, donde los modelos sugieren cambios importantes en los patrones de precipitación, que exacerbarían las condiciones de ausencia de lluvia y aumentarían la posibilidad de francas sequías en enormes regiones.

Poco se conoce acerca de los impactos de la geoingeniería en la biodiversidad y los ecosistemas, pero los efectos de una abrupta terminación de los experimentos de MRS sugieren la posibilidad de una amenaza grave a las especies. Los rápidos cambios en la temperatura podrían aumentar la probabilidad de extinciones en algunas de las regiones más biodiversas de la Tierra.

Dada la importancia de las consecuencias sociales, agrícolas y económicas sugeridas por los modelos, así como los riesgos posibles para la biodiversidad, argumentamos que los gobiernos deben fortalecer el principio precautorio y considerar una prohibición del Manejo de la Radiación Solar.



Inyección de aerosoles en la estratosfera para reflejar luz solar de regreso al espacio (CC) Wikimedia Commons

Entorno político

El Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB) de Naciones Unidas adoptó la moratoria de facto sobre actividades de geoingeniería en 2010 (Decisión X/33 (w)), con base en el principio de precaución. La decisión solicita a los gobiernos no permitir actividades de geoingeniería debido a los potenciales impactos en la biodiversidad y en las formas de sustento asociadas con ésta.

En 2015, el Acuerdo de París (AP) estableció la meta de que la temperatura media global se mantenga por debajo de 2°C hasta finales de este siglo. El Acuerdo no estableció regulaciones obligatorias para asegurar la reducción de las emisiones de gases con efecto de invernadero (GEI), así que para evitar medidas de mitigación para cumplir con la meta global, algunos gobiernos de los países más contaminantes están considerando a la geoingeniería como arreglo tecnológico para disminuir las temperaturas o remover gases de la atmósfera.

Por la importancia de las consecuencias sociales, agrícolas y económicas sugeridas por los modelos, así como los riesgos posibles para la biodiversidad, los gobiernos deben fortalecer el principio precautorio y considerar una prohibición del Manejo de la Radiación Solar.

*Investigación y redacción por
Alejandra Straffon*

Recuadro 1

Terminología:

La **geoingeniería** es la manipulación tecnológica deliberada a gran escala de los sistemas de la Tierra (en la estratósfera, el océano o el suelo) para intentar modificar el clima.

Esta puede incluir el **Manejo de la Radiación Solar (MRS)** – en la cual las intervenciones buscan bloquear parcialmente o reflejar mayor cantidad de luz solar hacia el espacio y con ello disminuir la temperatura de la Tierra– y la **Remoción de Gases de Efecto Invernadero (RGEI)**, dentro de esta última se encuentran las tecnologías de **Remoción de Dióxido de Carbono (RDC)**.

La **Inyección de Aerosoles Estratosféricos (IAE)** se considera la forma más económica y práctica técnicamente de MRS, de acuerdo a sus promotores. Esta incluye la propagación de “polvo” mineral a alturas de entre 15 y 20 km en la estratósfera para reducir la luz solar y disminuir la temperatura. Este “polvo” podría ser inyectado por mangueras (como un volcán artificial) o por globos, o bien, ser distribuido por aviones especialmente equipados. La propuesta más comúnmente considerada es inyectar sulfatos en aerosol en la estratósfera. Esto trae consigo un amplio rango de impactos y riesgos, incluyendo aún mayor pérdida de la capa de ozono, el cambio de patrones de precipitación y el potencial “shock de terminación”, resultado de un abrupto cambio en temperatura (véase abajo).

La **Productividad Primaria Neta (PPN)** es un indicador que muestra la capacidad de la biósfera terrestre para consumir dióxido de carbono. Provee un estimado de los impactos de la geoingeniería en la agricultura (Kravitz et al., 2013).

Hallazgos

Desde 2014, la comunidad científica ha desarrollado modelos computacionales (Modelos del Sistema Tierra, ó MST) que pueden evaluar los impactos que la geoingeniería podría tener a nivel regional y global. Se han usado más de diez modelos diferentes para examinar cómo el MRS podría reducir el forzamiento radiativo proveniente del Sol (Ver: Yu, et al., 2015).

Estos estudios concuerdan en que el MRS podría llevar a una disminución de la temperatura media del planeta. Sin embargo, los modelos indican diferentes impactos en diferentes partes del mundo. También sugieren que mientras que la pérdida de hielo marino en el Ártico sería menor, no se detendría, y los riesgos asociados con el incremento del nivel del mar continuarían (Berdhal et al., 2014).

Mientras que el MRS podría teóricamente restaurar la temperatura media global a los niveles pre-industriales, también podría alterar los ciclos hidrológicos globales. Los cambios en la precipitación serían significativos, con impactos potencialmente severos en agricultura, suministro de agua, biodiversidad y producción de energía. Las mayores reducciones en lluvia y las mayores posibilidades de aumento de sequías se concentrarían en regiones tropicales y subtropicales. Un fuerte consenso muestra que el promedio de la precipitación mundial se reduciría en 4.5%. En la mayoría de los estudios, las reducciones predichas son mayores en las grandes regiones monzónicas en Norte América (7%) y América del Sur (6%) (Tilmes, et al, 2013; Robock et al., 2008; Bala and Nag, 2012; Trenberth and Dai, 2007).

El MRS podría teóricamente restaurar la temperatura media global a los niveles pre-industriales, también podría alterar los ciclos hidrológicos globales. Los cambios en la precipitación tendrían con impactos potencialmente severos en agricultura, suministro de agua, biodiversidad y producción de energía.

Dentro de estas regiones, altamente pobladas y con extensas superficies cultivadas, se encuentran Mesoamérica, América Central, la cuenca del Amazonas y el norte de América del Sur, en las cuales se esperan reducciones en las lluvias tropicales, lo cual podría tener impactos socioeconómicos significativos, específicamente en la agricultura, el abastecimiento de agua y la producción de energía. Lo anterior hace que estas regiones sean particularmente susceptibles a cambios drásticos en el clima (Marengo et al., 2012).

Inyectar sulfatos a la estratósfera, aumentar el albedo sobre los océanos y suelos, o cualquier otra técnica de MRS no reducirá las concentraciones de dióxido de carbono de la atmósfera. El MRS solamente pospondría los impactos del cambio climático por el tiempo que la tecnología se despliegue, pero si se detiene, podría resultar en un cambio climático abrupto y más extremo (Jones A. et al., 2013).

Recuadro 2

Las Trayectorias de Concentración Representativas del IPCC y la geoingeniería

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) usa cuatro diferentes trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero en su quinto Informe de Evaluación (AR5), conocidas como Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas son identificadas como RCP2.6, RCP4.5, RCP6, y RCP8.5. Cada una se nombra por el rango posible del valor de su forzamiento radiativo para el año 2100, relativo a los valores pre-industriales (+2.6, +4.5, +6.0, y +8.5 W/m², respectivamente).

Estas trayectorias se utilizan en la modelación climática para describir cuatro posibles climas futuros, cada uno de los cuales dependerá de la cantidad de gases de efecto invernadero que serían emitidos en los años por venir. La mayoría de los escenarios que alcanzan concentraciones de larga duración de cerca de 450 ppm de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) para el año 2100, se considera que tienen una probabilidad mayor al 66% de mantener el incremento de la temperatura media global por debajo de 2°C en el curso del presente siglo y relativo a los niveles pre-industriales. Nótese que solamente las trayectorias RCP2.6 y RCP4.5 podrían supuestamente alcanzar esta meta (Figura B2.1).

Los escenarios que mantienen el incremento de la temperatura global por debajo de los 2° C asumen el uso de técnicas de geoingeniería de remoción de dióxido de carbono (RDC) de gran escala, principalmente mediante la aforestación y el uso de bioenergía con captura y almacenamiento de carbón (BECCS, por sus siglas en inglés), pero estos escenarios no asumen el uso de técnicas de MRS. De acuerdo con las tecnologías existentes de RCD se requerirían cambios de uso de suelo amplios y de gran escala, que podrían causar impactos ambientales y socio-económicos a nivel local y regional, así como riesgos transfronterizos para ecosistemas terrestres y marinos (i.e., extendiéndose más allá de las fronteras nacionales).

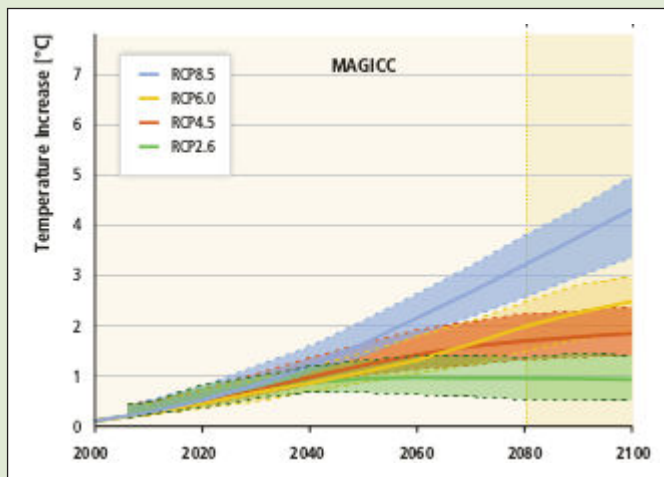


Figura B2.1. Incremento de temperatura (relativo al promedio de 1986 – 2005) para los escenarios de las RCP (IPCC, 2014b).

Estos hallazgos sugieren que el uso de técnicas de RDC podrían implicar desafíos adicionales para la cooperación entre países. Estas limitaciones, además de la falta de evidencia técnica, económica y ambiental, así como de la viabilidad de las propuestas de RDC, implican que estas técnicas podrían no implementarse lo suficientemente rápido para alcanzar los niveles de reducción de temperatura requeridos.

El Reporte de la Brecha de Emisiones 2016 hecho por la ONU Medio Ambiente, concluyó que si bien las Contribuciones Previstas y Determinadas a Nivel Nacional (INDC, por sus siglas en inglés), podrían reducir las emisiones comparadas con niveles globales de emisiones “business as usual” (igual que siempre, línea negra en Figura B2.2), estas contribuciones se encuentran lejos de lo requerido para lograr una trayectoria de emisiones que mantuviera la temperatura por debajo de un incremento de 2°C (línea azul).

El reporte estimó que la completa implementación tanto de las contribuciones incondicionadas como las condicionadas implicaría una brecha en las emisiones de 12 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (GtCO₂e) en 2030. Lo anterior es equivalente a las emisiones actuales de China provenientes del uso de combustibles fósiles y de la industria. Esta brecha refleja la diferencia entre las INDC y el nivel de emisión con menor costo de una trayectoria que mantenga el incremento de temperatura debajo de 2°C y se traduce en un aumento de la temperatura media global de entre 2.9 a 3.4°C (Figura B2.2).

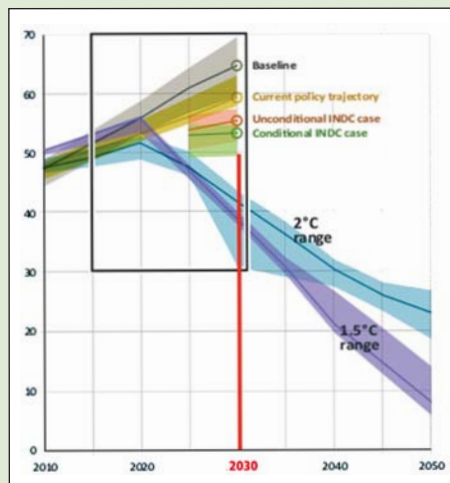


Figura B2.2 Emisiones anuales globales totales de gases con efecto de invernadero (GtCO₂e) bajo diferentes escenarios y la brecha de emisiones en 2030 (UNEP, 2016).

Los promotores de la geoingeniería y algunos gobiernos utilizan esta brecha para argumentar que tanto las técnicas de MRS como las de RDC son necesarias para lograr las metas acordadas en el Acuerdo de París.

Escenarios de modelos computacionales para experimentos de Inyección de Aerosoles Estratosféricos

Los resultados de los modelos indican que bajo todos los experimentos de MRS analizados por el Proyecto de Comparación de Geoingeniería (GeoMIP) (véase Recuadro 3), la temperatura media del planeta podría reducirse a los niveles pre-industriales, o bien, a la temperatura media entre 2010 y 2029 (RCP4.5; experimentos G3 y G4). Esta reducción en temperatura podría diferir entre regiones debido a que la temperatura en los polos norte y sur podría continuar incrementándose. De acuerdo con un estudio, la Inyección de Aerosoles en la Estratosfera, IAE, (experimentos G3 y G4) no podría detener la pérdida de superficie de hielo marino en el Ártico (la cual se encuentra declinando a una tasa de ~12 por ciento por década (Berdahl et al., 2014).

En dos de cinco modelos, la pérdida total de hielo en el mes de septiembre (cuando la superficie congelada del Ártico alcanza su mínimo) podría ocurrir antes de 2060 dependiendo del tipo de intervención con MRS.

Todas las intervenciones con geoingeniería (véase Recuadro 3) disminuyen la precipitación en todo el mundo, aunque los efectos regionales pueden variar (Figura 1). La precipitación es más difícil de modelar que la temperatura y por ello los mapas de la Figura 1 muestran una mayor variación entre los modelos para grandes áreas del planeta (indicadas con puntos negros).

Recuadro 3

Simulaciones y líneas base para la geoingeniería

El Proyecto de Comparación de Geoingeniería (GeoMIP) se creó para registrar y comparar los efectos climáticos esperados de distintas simulaciones de geoingeniería. Los primeros dos experimentos (G1 y G2) simulados reducen la cantidad de luz solar que entra a la atmósfera, es decir, la atenuación solar (ocasionada por bloquear la luz solar desde el espacio exterior). Los experimentos subsecuentes (G3 y G4), simulan la inyección de aerosoles en la estratósfera (IAE) durante el periodo del 2020 al 2070 usando sulfatos en aerosol, para el G3 la tasa de inyección de sulfatos es constante (5 Tg de dióxido de sulfuro (SO_2) cada año) y en el G4 es variable en el tiempo (en comparación, la erupción del Monte Pinatubo en 1991 causó una liberación de 17 Tg de SO_2). Tasas mayores de inyección (hasta 45 Tg de SO_2 por año) podrían ser necesarias en 2020 para mantener la temperatura si continuaran las tasas de emisión de costumbre, “business as usual” (Niemeier and Timmreck, 2015).

Diversos estudios concuerdan en que la atenuación solar desde el espacio (experimentos G1 y G2) y la IAE (experimentos G3 y G4) podrían tener consecuencias diferentes para la temperatura y la precipitación a escala regional.

En particular, los impactos de los cambios en los patrones de precipitación podrían ser sumamente severos (Yu X. et al, 2015; Kalidindi S. et al, 2014). Este resumen se enfoca en los resultados de los experimentos relacionados con los impactos potenciales del despliegue de inyección de aerosoles en la estratósfera (IAE).

Para evaluar los resultados de las simulaciones computacionales, se debe establecer una línea base que sirva como periodo de referencia a partir del cual se calculen los cambios futuros modelados en el clima. La mayoría de las evaluaciones de impactos buscan determinar el efecto del cambio climático con respecto al presente y por ello se favorecen líneas base de periodos recientes (IPCC, 2001). Más recientemente, el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés) usó como línea base el estado del clima futuro proyectado (promediado entre 2006-2300) resultado de la trayectoria de concentración representativa RCP4.5 para propósitos de comparación (Taylor et al., 2012).

Cualquiera que sea el periodo adoptado, es importante reconocer que esta definición afectará el resultado (IPCC, 2001). Por ejemplo, los cambios proyectados en precipitación y temperatura de simulaciones con geoingeniería serían mayores si la línea base fuera el clima pre-industrial que si fuera el clima del siglo XX. Esto significa que el acumulado de impactos ambientales y sociales sería mayor que lo estimado en esta revisión.

Hallazgos para América Latina

Para América Latina, al menos uno de los experimentos del GeoMIP predice (es decir, más del 70% de los modelos usados concuerdan) que la precipitación se reducirá entre 0 y 100 mm/año (tonos amarillos en Figura 1) en México, Guatemala, Belice, El Salvador, Honduras, Cuba, Las Antillas, Colombia, Brasil, Venezuela, Guyana, Surinam, Guyana Francesa, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile, Argentina y Uruguay con variaciones regionales dentro de los países. Pequeños incrementos en los niveles de lluvia (tonos azules en Figura 1), en un rango de los 0 a 50 mm/año podrían experimentarse en América Central, Argentina, Paraguay y Uruguay (sólo considerando los experimentos G3 y G4, usando IAE uniforme). Las reducciones en la cuenca del Amazonas son especialmente significativas, aunque hay una gran variabilidad entre los modelos para esta región en comparación con otras regiones del mundo.

Un estudio de 2013 mostró cambios en la precipitación y la Productividad Primaria Neta (PPN) para el norte y el noreste de Brasil, cuando se aplicaron previamente inyecciones de sulfatos. Las inyecciones de sulfatos en el hemisferio norte aumentan la probabilidad de precipitación y PPN en el noreste de Brasil, con incrementos de hasta 100 mm por mes.² Sin embargo, el norte de Brasil podría experimentar un decremento de hasta 80 mm por mes (Figura 2a). Resultados similares fueron encontrados para la PPN (no se muestran). El modelaje de inyecciones de sulfato en el hemisferio sur (Figura 2b), muestra lo contrario: en el noreste de Brasil se observa un decremento en ambas variables, con reducciones de precipitación de hasta 80 mm por mes, mientras que en el norte de Brasil se observa un incremento equivalente (Haywood et al., 2013).

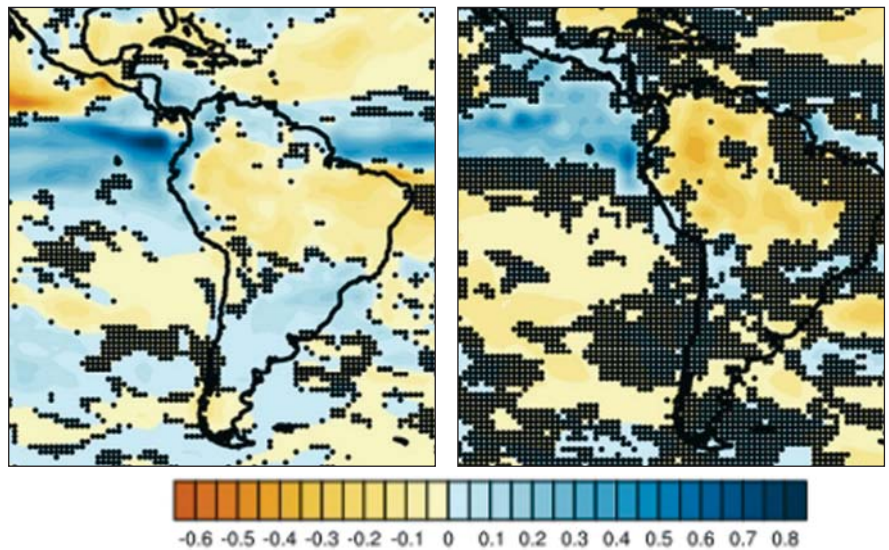


Figura 1. Ensamble¹ de anomalías medias de precipitación entre experimentos del GeoMIP y el clima promedio asociado a RCP4.5 sobre el periodo 2010-2029 para los experimentos G3 (panel de arriba) y G4 (panel de abajo). Las zonas punteadas (negras) indican que menos del 70% de los modelos concuerdan en si la precipitación podría aumentar o decrecer (Yu X. et al., 2015).

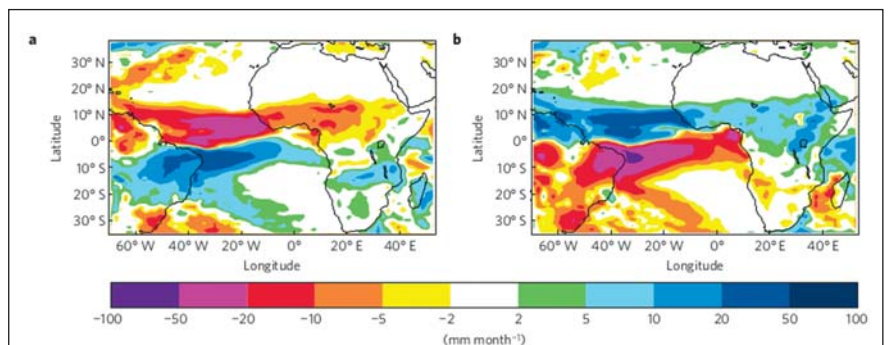


Figura 2. Respuesta del modelo de precipitación para simulaciones con geoingeniería. Cambio en la precipitación media anual promediado sobre el periodo de 2020 a 2070 con inyecciones de sulfatos en el hemisferio norte (a) y en el hemisferio sur (b) (Haywood et al., 2013).

De acuerdo con un marco teórico basado en el riesgo desarrollado por Ferraro et al. (2014), es posible clasificar los impactos de acuerdo a cómo la geoingeniería incrementa o reduce el riesgo de un cambio climático sustancial. En este estudio se cuadruplicaron las concentraciones de dióxido de carbono³ (respecto de sus niveles pre-industriales) y se usó IAE uniforme en el planeta para restaurar las temperaturas futuras globales a los niveles del siglo XX.

¹ Un ensamble es el resultado de un proceso de síntesis en el que dos o más modelos computacionales diferentes muestran sus resultados en una sola salida o gráfico que permite mejorar la precisión del análisis predictivo.

² Los autores usaron el modelo climático HadGEM2-ES para desarrollar dos experimentos que son variantes del experimento G4 del GeoMIP. La cantidad de aerosoles de sulfato que fueron inyectados fue de 5 Tg SO₂ al año.

³ Considerando 355 ppmv de CO₂ la concentración de la época pre-industrial.

Los autores encontraron que lo anterior podría resultar en cambios sustanciales de la precipitación a lo largo de casi la mitad de la superficie de la Tierra (42%). En la superficie afectada vive el 36% de la población mundial y genera 60% del producto interno bruto mundial (véase Figura 3).

Los resultados muestran que la geoingeniería con sulfatos en aerosol es probablemente inefectiva⁴, ya que aumenta los cambios en temperatura en áreas que de hecho ya se encuentran en riesgo, particularmente sobre el Océano del Sur, el Atlántico Norte y Sur y el Pacífico Norte y Sur (Figura 3A). En las regiones ecuatoriales y subtropicales, los resultados indican incrementos dañinos⁵ del riesgo climático asociados con cambios en la precipitación en áreas que actualmente no se encuentran en riesgo de cambio climático (Figura 3B).

Otros experimentos de geoingeniería solar

Un estudio de 2015 utilizó seis esquemas diferentes de MRS – modificación del albedo por cultivos, por desiertos y por océanos, además de geoingeniería de spray de agua marina, adelgazamiento de nubes cirrus e inyección de dióxido de sulfuro en la estratósfera – los cuales mostraron como característica común, cambios potencialmente dañinos en la precipitación regional⁶ (Crook et al., 2015).

Un estudio anterior encontró que el incremento de albedo sobre la tierra⁷ tenía el efecto de disminuir la precipitación global en un 13%, así como de disminuir el escurrimiento sobre tierra en un 22%, lo que redundaba en una menor cantidad de agua en el suelo (Bala and Nag, 2012).

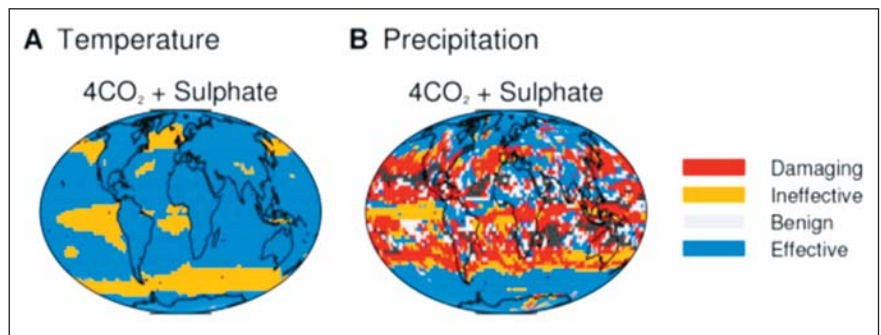


Figura 3. Mapas de geoingeniería usando IAE considerando un marco teórico basado en el riesgo. (A) climatología media anual de temperatura superficial y (B) climatología media anual de precipitación. La simulación de “4CO₂”, se refiere a la concentración atmosférica de 4x355= 1420 ppmv (Ferraro et al. (2014)).

La mayor parte de las regiones en las que se reduce la precipitación (aproximadamente 500 mm al año) se encuentran en tierras tropicales como El Amazonas y América Central. Decrementos importantes son también observados en América del Sur con reducciones de entre 100 y 300 mm por año (Figura 4).

Más recientemente, una modelación computacional experimentó con el uso de una espuma no dispersiva (hecha de pequeñas microburbujas, altamente reflectivas) sobre la superficie del océano⁸, en particular, sobre las corrientes oceánicas de los tres giros subtropicales en el hemisferio sur. Los resultados muestran que con esta configuración, los niveles de precipitación podrían incrementarse o mantenerse en las regiones altamente pobladas y más cultivadas del mundo, en particular, en regiones que dependen de sistemas monzónicos para la lluvia (Gabriel et al. 2017). Sin embargo, la implementación de esta clase de tecnología a gran escala no es viable en la actualidad. Los impactos en las pesquerías y la biodiversidad marina no fueron evaluados en el estudio.

⁴ Inefectiva (tonos amarillos en Figura 3) significa que el riesgo se incrementa en áreas en riesgo, es decir, la geoingeniería incrementa la probabilidad de un cambio climático donde ya ocurre.

⁵ Dañino (tonos rojos en Figura 3) significa que el riesgo se incrementa en áreas que no están en riesgo, es decir, la geoingeniería incrementa la probabilidad de un cambio climático donde aún no ocurre.

⁶ Los autores usaron una configuración del modelo HadGEM2 y el experimento G4 de GeoMIP. Las simulaciones control estuvieron basadas en RCP4.5 sin considerar ningún manejo de la radiación solar.

⁷ Los autores usaron el modelo NCAR CAM3.1 y simulaciones de 70 años considerando la configuración “slab ocean” (fueron analizados los últimos 40 años de simulación para estudiar el equilibrio del sistema climático).

⁸ Los autores usaron el modelo CESM CAM4-Chem y RCP6.0 como línea base.

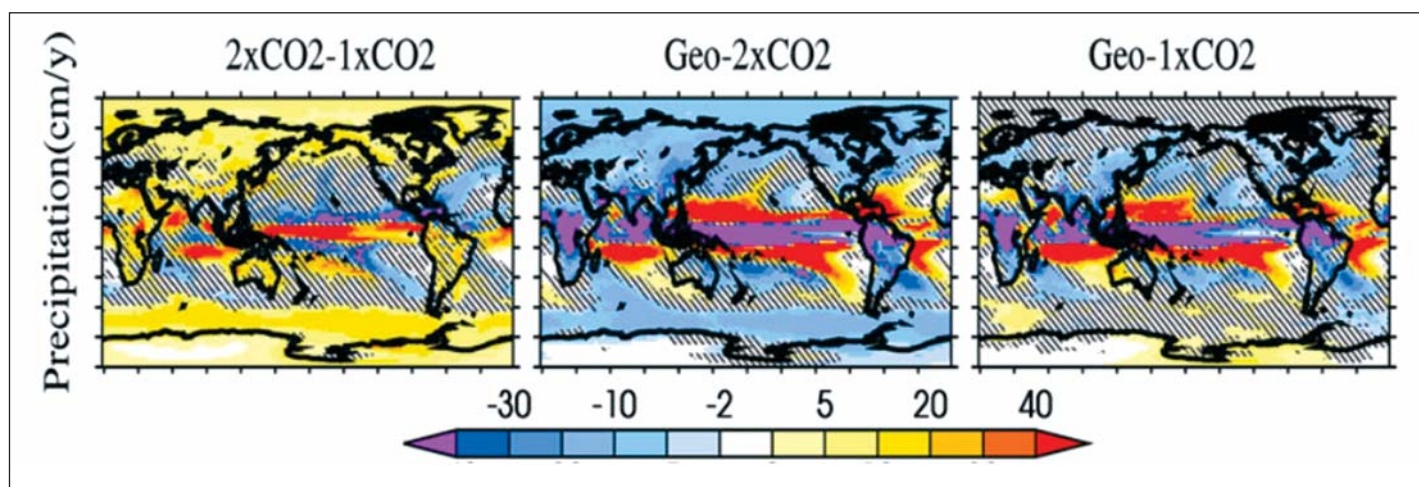


Figura 4. Cambios en la precipitación media anual debidos a la duplicación del CO₂ atmosférico (2x CO₂ - 1x CO₂), geoingeniería menos la duplicación del CO₂ atmosférico (Geo - 2x CO₂) y geoingeniería menos los niveles pre-industriales del CO₂ atmosférico (Geo - 1x CO₂). Las áreas sombreadas de gris indican las regiones donde los cambios no son significativos a un nivel de confianza del 99% (Bala and Nag, 2012). “1x CO₂” se refiere a simulaciones con concentraciones de CO₂ atmosférico de 355 ppm, “2x CO₂” simulaciones con 710 ppm y la simulación “Geo” considera que las concentraciones de CO₂ son el doble de 710 ppm y el tamaño de gota de nube es 0.0041 mm sobre regiones continentales.

¿Qué ocurriría si el MRS se detiene?

Diversos estudios han señalado que si el MRS se detuviera repentinamente, la consecuencia sería un incremento abrupto en la temperatura, que podría resultar en temperaturas mayores a las previas a la implementación. Este fenómeno se conoce como el “shock de terminación”. Lo cual haría más difícil la adaptación para la naturaleza y la sociedad que un incremento gradual de temperatura.

Un estudio usó 11 modelos diferentes para examinar los cambios en el clima causados por una suspensión repentina de la reducción de energía solar después de 50 años de contrarrestar el forzamiento radiativo antropogénico (mediante la disminución de la radiación solar) considerando incrementos anuales de 1% (Jones et al., 2013). Todos los modelos concordaron en que podría ocurrir un incremento rápido en la temperatura media global al término de la intervención, acompañado de incrementos en las tasas de precipitación media global y decrementos en la cubierta de hielo marino. Los modelos no mostraron acuerdo en los impactos en la media global de la PPN. Sin embargo, hay un alto nivel de acuerdo en la distribución geográfica del cambio de temperatura: sería más rápido el calentamiento en latitudes altas y sobre tierra.

La mejor forma de evitar el shock de terminación por el cese repentino del sería evitar que grandes cantidades de aerosoles sean necesarios para reducir los riesgos climáticos (Parker and Irvine, 2018). Idealmente, reducciones ambiciosas en las emisiones de gases de efecto invernadero pueden eliminar la necesidad de inyecciones estratosféricas.

¿Cuáles serían los impactos en la biodiversidad?

Los impactos indirectos de la geoingeniería han sido poco estudiados. En particular, los impactos en la biodiversidad y los ecosistemas han sido prácticamente inexplorados. Un estudio reciente comparó los impactos en la biodiversidad considerando un escenario moderado de cambio climático (RCP4.5), con intervenciones rápidas de geoingeniería, seguidas por un cese abrupto y usando las “velocidades climáticas” como indicador (Trisos, et al. 2018).

La velocidad climática es la rapidez y dirección que una especie necesitaría para moverse y lograr sobrevivir a los cambios en el clima, en específico considerando la temperatura (Figura 5) y la precipitación (no se muestra). Comparado con un escenario de cambio climático moderado (RCP4.5), las rápidas intervenciones de geoingeniería podrían reducir las velocidades de la temperatura, es decir, la velocidad con que aumenta la temperatura hasta cero en los centros de mayor biodiversidad marina y terrestre (dando un alivio momentáneo a especies estresadas por el aumento en la temperatura, como los corales). En contraste, una terminación repentina de la IAE podría incrementar la rapidez con que aumenta la temperatura sobre océanos y continentes a niveles sin precedentes, a velocidades que podrían ser mayores al doble de las velocidades asociadas al cambio climático reciente y futuro. Las velocidades con que aumenta la temperatura son más extremas con la terminación abrupta en los océanos tropicales, la cuenca del Amazonas, África, Eurasia y las regiones polares.

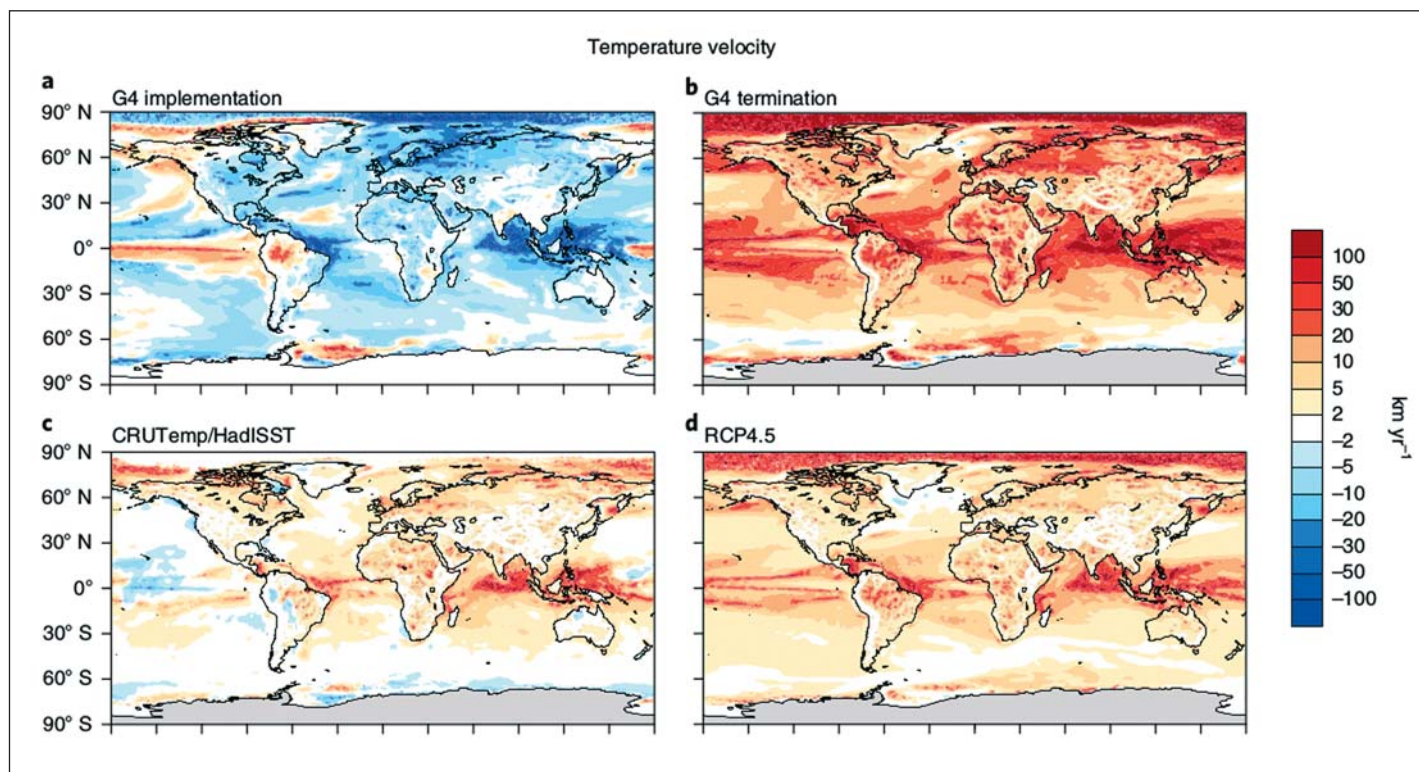


Figura 5. Velocidades de aumento de temperatura asociadas a la implementación de geoingeniería (a), terminación abrupta (b), clima histórico 1960-2014 (c) y RCP4.5 (d). (Trisos et al., 2018)

Comparado con el RCP4.5, un 32% adicional de la superficie de la Tierra podría estar expuesto a un alto desplazamiento climático (>10 km por año) si ocurre una terminación abrupta de MRS. Los océanos subtropicales y templados del hemisferio norte, gran parte de América del Norte, África y Eurasia serían las regiones más afectadas. Estas regiones podrían enfrentar los incrementos más significativos en el riesgo de extinciones locales debido a una terminación abrupta y la consecuente dificultad de las especies para adaptarse a movimientos climáticos rápidos (Trisos, et al. 2018).

En los biomas donde la velocidad climática es mayor al doble, ocurriría una fragmentación climática rápida, con grandes diferencias regionales, por ejemplo entre los pastizales templados y los bosques. La fragmentación climática significa que los cambios predichos en la temperatura y la precipitación son grandes y espacialmente divergentes, lo que resulta en que las especies están incapacitadas para moverse, lo suficientemente rápido, en respuesta a estos cambios climáticos.

Detener las intervenciones de geoingeniería una vez desplegada podría incrementar significativamente las amenazas a la biodiversidad que ya ocurren con el cambio climático. Los pastizales, bosques templados y biomas tipo Mediterráneo son los más expuestos a incrementar la rapidez de su fragmentación climática porque en esas regiones la divergencia en las condiciones de temperatura y precipitación incrementan las probabilidades de extinción local, véase Figura 6 (Trisos et al., 2018).

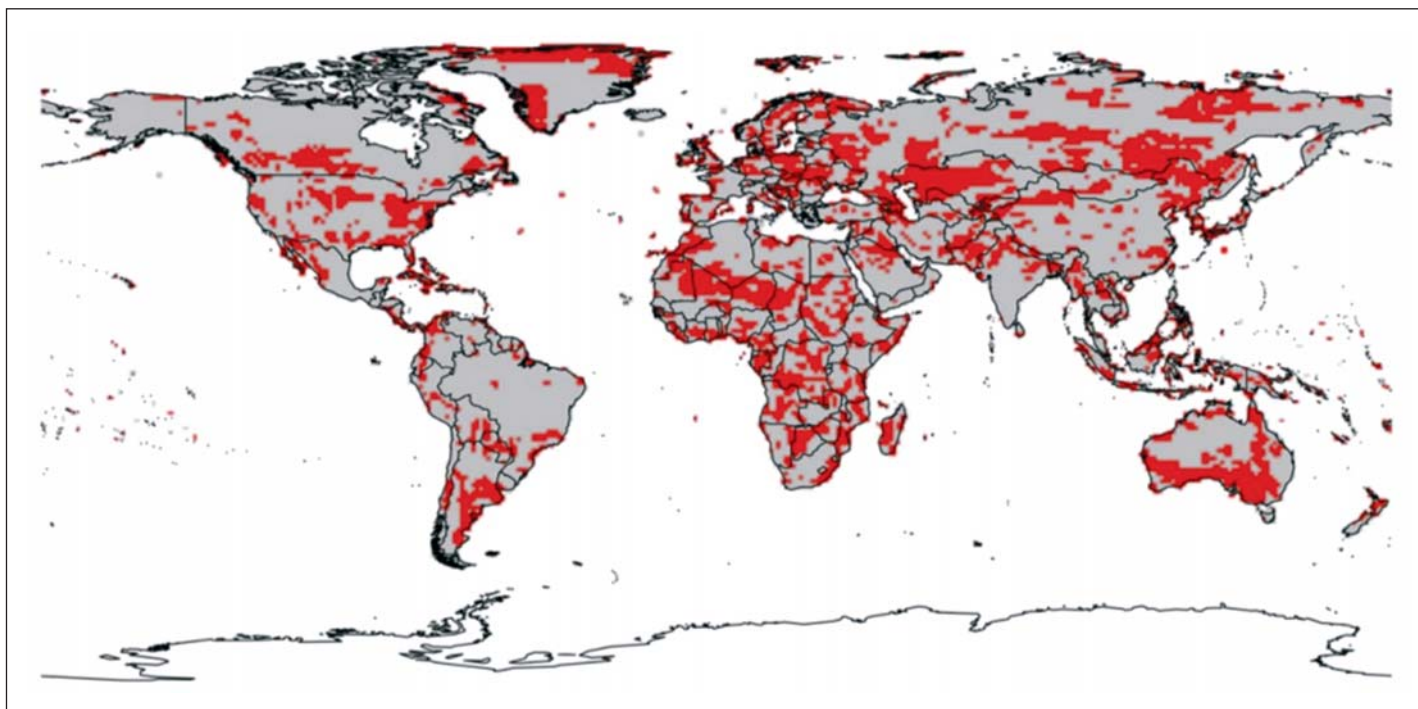


Figura 6. Incremento relativo en el riesgo de fragmentación climática por una terminación repentina de la geoingeniería. El color rojo indica las regiones donde la rapidez y divergencia ($>90^\circ$) de la velocidad de terminación de la temperatura y la precipitación es el doble o mayor al RCP4.5 (Trisos et al., 2018).

Investigadores han encontrado que una vez que la geoingeniería ha comenzado, las velocidades con que aumenta la temperatura no continuarían reduciéndose, incluso si los incrementos en temperatura son contrarrestados. Esto significa que las intervenciones con geoingeniería podrían sólo ofrecer un alivio momentáneo (durante las primeras décadas de la inyección estratosférica) después del cual las especies enfrentarían velocidades de temperatura similares. A lo largo de los centros de mayor biodiversidad terrestre y marina, una terminación abrupta resulta en velocidades de temperatura extremas que van de dos a cuatro veces más que las de datos históricos o el cambio climático futuro.

La mayor parte de la biodiversidad del mundo reside en los trópicos. Para las especies tropicales que son sensibles a cambios en temperatura, incluso pequeños aumentos de temperatura pueden amenazar su supervivencia (McCain et al., 2011). Las especies tropicales son más sensibles a la temperatura que sus contrapartes de climas templados y frecuentemente viven muy cerca o por arriba de sus temperaturas óptimas, por lo que los cambios en el clima son más importantes para su supervivencia. Un cese abrupto de las intervenciones de geoingeniería ocasionaría una seria amenaza para la supervivencia de las especies en las regiones mega diversas de la Tierra (Trisos et al., 2018).

Conclusiones

En los últimos años la comunidad científica ha desarrollado un número mayor de modelos computacionales más complejos para evaluar los posibles impactos de la geoingeniería a nivel global y regional. La mayoría de éstos concuerdan en que a nivel global, el MRS podría reducir las temperaturas, pero no podría evitar el derretimiento de las capas de hielo de los polos norte y sur, y la consiguiente elevación del nivel del mar.

La gran mayoría de los modelos indican que el promedio de la precipitación a nivel global y particularmente en América Latina podría disminuir como resultado de las intervenciones de MRS comparadas con escenarios de cambio climático. Cualquier periodo extenso de baja precipitación en América Latina podría ocasionar impactos negativos en la agricultura y sectores energéticos, así como en las condiciones de vida de miles de millones de personas.

En la cuenca del Amazonas (norte y noreste de América del Sur) se proyectan efectos dramáticos en los patrones de lluvia asociados a la implementación de IAE y otros esquemas de aumento de albedo, con potenciales consecuencias ecológicas y socioeconómicas catastróficas en escala regional.

Estudios recientes arbitrados sobre el MRS – brevemente reseñados en este informe – indican un fuerte consenso respecto a que habrá amplias regiones del planeta en las que la IEA podría ser dañina o inefectiva, concentrando las consecuencias negativas en las regiones tropicales y subtropicales.

La incertidumbre de los modelos es un tema crucial para evaluar las propuestas de MRS, particularmente en los aspectos relacionados con la precipitación, la productividad primaria neta de los ecosistemas y la acidificación de los océanos. Lo anterior afecta directamente la confianza y credibilidad que puede darse a la efectividad de las intervenciones de geoingeniería, así como a los impactos y la viabilidad de las proyecciones de largo plazo.

De cualquier forma, la mayor parte de los modelos propuestos que usan MRS indican impactos desiguales. Dada la importancia de la lluvia y la vegetación para las sociedades humanas, para las especies vivientes y la diversidad biológica y cultural, la enorme falta de conocimiento debería al respecto debería llevarnos a una aplicación estricta del principio de precaución para evitar riesgos futuros mayores.

Además, los cambios climáticos que resultan de la terminación abrupta de las intervenciones de geoingeniería podrían ser severamente dañinos para la biodiversidad, mientras que los alcances de su adaptación podrían reducirse. En particular, la supervivencia de las especies en las regiones mega diversas de la Tierra sería potencialmente amenazada, con los cambios climáticos predichos aumentarían las probabilidades de extinción local cuando los nichos climáticos de las especies se fragmenten.

Intervenciones de geoingeniería del tipo de MRS, podrían ofrecer un alivio momentáneo (durante las primeras décadas de la inyección estratosférica) para las especies estresadas por el calor, después de este primer alivio, las velocidades climáticas serían similares a las de un escenario de cambio climático moderado. Entonces, en términos de biodiversidad la geoingeniería implica más preocupaciones que beneficios. Los impactos en la biodiversidad y las consecuencias ambientales han sido poco explorados y persisten muchas lagunas de conocimiento.

Dados los riesgos para las naciones de América Latina, descritos en este informe, los gobiernos deberían fortalecer el principio precautorio establecido por la moratoria de facto que acordó el Convenio sobre Diversidad Biológica de Naciones Unidas y considerar ampliar la moratoria a una prohibición del Manejo de la Radiación Solar para evitar que un grupo de naciones poderosas continúe desarrollando y eventualmente implementando técnicas de geoingeniería con consecuencias catastróficas para el continente.

Estudios recientes sobre el MRS indican un fuerte consenso respecto a que habrá amplias regiones del planeta en las que la inyección de aerosoles en la estratosfera podría ser dañina o inefectiva, concentrando las consecuencias negativas en las regiones tropicales y subtropicales.

Referencias

- Bala, G., and B. Nag, 2012. Albedo enhancement over land to counteract global warming: Impacts on hydrological cycle. *Clim. Dyn.*, 39,1527–1542.
- Berdahl, M., Robock, A., Ji, D., Moore, J. C., Jones, A., Kravitz, B., Watanabe, S., 2014. Arctic cryosphere response in the Geoengineering Model Intercomparison Project G3 and G4 scenarios. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119,1308–1321.
- Crook, J. A., Jackson L. S., Osprey S. M., Forster P. M., 2015. A comparison of temperature and precipitation responses to different Earth radiation management geoengineering schemes. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 9352–9373.
- Ferraro, A. J., Charlton-Perez, A. J., Highwood, E. J., (2014. A Risk-Based Framework for Assessing the Effectiveness of Stratospheric Aerosol Geoengineering. *PLoS ONE*, 9(2): e88849.
- Gabriel, C. J., Robock, A., Xia, L., Zambri, B., Kravitz, B., 2017. The G4Foam Experiment: Global climate impacts of regional ocean albedo modification, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 595-613.
- Glienke, S., Irvine, P. J., Lawrence, M. G., 2015. The impact of geoengineering on vegetation in experiment G1 of the GeoMIP. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 10,196–10,213.
- Haywood, J. M., Jones, A., Bellouin, N., Stephenson, D. B., 2013. Asymmetric forcing from stratospheric aerosols impacts Sahelian drought. *Nat. Clim. Change*, 3(7), 660–665.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- IPCC, 2014a. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC, 2014b. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jones, A., Haywood, J.M., Alterskjaer, K., Boucher, O., Cole, J.N.S., Curry, C.L., Irvine, P.J., Ji, D., Kravitz, B., Kristjánsson, J.E., Moore, J.C., Niemeier, U., Robock, A., Schmidt, H., Singh, B., Tilmes, S., Watanabe, S., Yoon, J.-H., 2013. The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *J. Geophys. Res. Atmos.* 18 (17), 9743–9752.
- Kalidindi S, Bala G, Modak A, Caldeira K., 2014. Modeling of solar radiation management: a comparison of simulations using reduced solar constant and stratospheric sulfate aerosols. *Clim Dyn*, 44:2909-2925.
- Kravitz, B., Caldeira, K., Boucher, O., Robock, A., Rasch, P.J., Alterskjær, K., Karam, D.B., Cole, J.N.S., Curry, C.L., Haywood, J.M., Irvine, P.J., Ji, D., Jones, A., Kristjánsson, J.E., Lunt, D.J., Moore, J.C., Niemeier, U., Schmidt, H., Schulz, M., Singh, B., Tilmes, S., Watanabe, S., Yang, S., Yoon, J.-H., 2013. Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *J. Geophys. Res. Atmos.* 118 (15), 8320–8332.
- Keith, D., Weisenstein, D., Dykema, J., Keutsch, F., 2016. Stratospheric solar geoengineering without ozone loss. *PNAS*, 113 (52), 14910–14914.
- Marengo J. A., Liebmann, B., Grimm, A. M., Misra, V, Silva Dias, P. L., Cavalcanti, I. F. A., Carvalho, L M. V., Berbery, E. H., Ambrizzi, T., Vera, C. S., Saulo, A. C., Nogues-Paegle, J., Zipser, E., Sethk, A., Alvase, L. M., 2012. Recent Developments on the South American Monsoon System. *International Journal of Climatology*, 32: 1-21.
- McCain, C. M., Colwell, R. K., 2011. Assessing the threat to montane biodiversity from discordant shifts in temperature and precipitation in a changing climate. *Ecol. Lett.* 14, 1236–1245.

- Niemeier, U., Timmreck, C., 2015. What is the limit of climate engineering by stratospheric injection of SO₂? *Atmos. Chem. Phys.* 15 (16), 9129–9141.
- Parker, A. and Irvine, P. J., 2018. The Risk of Termination Shock From Solar Geoengineering, *Earth's Future*, 9999. <https://doi.org/10.1002/2017EF000735>
- Robock, A., Oman, L., Stenchikov, G. L., 2008. Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections, *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, D16101.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485–498.
- Tilmes, S., Fasullo, J., Lamarque, J.-F., Marsh, D.R., Mills, M., Alterskjær, K., Muri, H., Kristjánsson, J.E., Boucher, O., Schulz, M., Cole, J.N.S., Curry, C.L., Jones, A., Haywood, J., Irvine, P.J., Ji, D., Moore, J.C., Karam, D.B., Kravitz, B., Rasch, P.J., Singh, B., Yoon, J.H., Niemeier, U., Schmidt, H., Robock, A., Yang, S., Watanabe, S., 2013. The hydrological impact of geoengineering in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *J. Geophys. Res. Atmos.* 118 (19), 11,036–11,058.
- Trisos, C., H., Amatulli, G., Gurevitch, J., Robock, A., Xia, L., Zambri, B., 2018. Potentially dangerous consequences for biodiversity of solar geoengineering implementation and termination. *Nature Ecology and Evolution*. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0431-0>
- Trenberth, K. E. and A. Dai, 2007. Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophysical Research Letters*, vol. 34:L15702.
- UNEP, 2016. The Emissions Gap Report 2016. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi.
- Xia, L., Robock, A., Cole, J., Curry, C., Ji, D., Jones, A., Kravitz, B., Moore, J., Muri, H., Niemeier, U., Singh, B., Tilmes, S., Watanabe, S., Yoon, J., 2014. Solar radiation management impacts on agriculture in China: A case study in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 8695–8711.
- Yang, H., Dobbie, S., Ramirez-Villegas, J., Feng, K., Challinor, A., Chen, B., Gao, Y., Lee, L., Yin, Y., Sun, L., Watson, J., Koehler, A., Fan, T., Ghosh, S., 2016. Potential negative consequences of geoengineering on crop production: A study of Indian groundnut, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 11,786–11,795.
- Yu, X., Moore, J. C., Cui, X., Rinke, A. 2015. Impacts, effectiveness and regional inequalities of the GeoMIP G1 to G4 solar radiation management scenarios. *Glob. Planet. Change*, 129, 10–22.
- Zhao, L., Yang, Y., Cheng, W., Ji, D., Moore, J., 2017. Glacier evolution in high-mountain Asia under stratospheric sulfate aerosol injection geoengineering. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 6547–6564.

Acerca del Grupo ETC

El Grupo ETC aborda las cuestiones socioeconómicas y ecológicas relacionadas con las nuevas tecnologías que impactan a las personas marginadas del mundo.

Investigamos la erosión ecológica, incluyendo la erosión de las culturas y los derechos humanos; el desarrollo de nuevas tecnologías, especialmente agrícolas, pero también de otro tipo, incluyendo genómica, robótica, inteligencia artificial, convergencias nanométricas; y supervisamos cuestiones de gobernanza global, incluyendo el control corporativo y la concentración de tecnologías.



Operamos a nivel global y regional, trabajando en estrecha colaboración con organizaciones de la sociedad civil y movimientos sociales, especialmente en África, Asia y América Latina.

www.etcgroup.org