

Remoción de dióxido de carbono y compensación de emisiones: impactos, riesgos y limitaciones

Catalina Gonda

Gonda, C. (2023). Remoción de dióxido de carbono y compensación de emisiones: impactos, riesgos y limitaciones. Fundación Ambiente y Recursos Naturales (FARN).



DOCUMENTO FARN
MAYO 2023

Índice

Introducción	03
Entendiendo la dinámica del problema	03
La remoción de dióxido de carbono y la carbono neutralidad	05
La remoción de dióxido de carbono en los compromisos climáticos	08
Limitaciones, consideraciones y riesgos de la remoción de dióxido de carbono	09
Disponibilidad de tierras y competencia con otros usos del suelo	09
Permanencia y temporalidad	10
Impactos sobre la biodiversidad	11
Riesgos en torno a la compensación de emisiones como estrategia de mitigación	12
Las compensaciones no abordan el problema de fondo	13
Las emisiones provenientes de los combustibles fósiles no son equivalentes a las del uso de la tierra	14
Falta de integridad de los créditos de carbono	14
Justicia climática y profundización de desigualdades	15
Conclusiones y recomendaciones	16
Referencias	18

Introducción

Evitar que se supere el umbral crítico de 1,5 °C de temperatura media global requiere alcanzar la carbono neutralidad a mediados de este siglo y, complementariamente, eliminar gases de efecto invernadero (GEI) de la atmósfera.

La remoción de dióxido de carbono (RDC) surge como un enfoque para secuestrar este gas a gran escala mediante nuevas tecnologías o bien a través de métodos biológicos como la forestación, la restauración de ecosistemas y el secuestro de carbono en los suelos.

Algunos de estos enfoques ya se están implementando, mientras que otros se incluyen en los escenarios de descarbonización y los compromisos climáticos asumidos por varios países bajo el Acuerdo de París. Sin embargo, existen grandes interrogantes e incertidumbre acerca de la necesidad y la viabilidad de la RDC proyectada, los riesgos asociados y las implicancias que su despliegue puede tener para la equidad y otros objetivos de desarrollo sostenible.

Para la Argentina, el debate en torno a la RDC es todavía incipiente y se encuentra principalmente acotado al rol del sector de agricultura, ganadería, silvicultura y otros usos de la tierra (AGSOUT). Asimismo, existe un creciente interés por parte de diversos actores en el país en insertarse en los mercados de carbono para comercializar resultados de mitigación basados en la RDC.

En este contexto, surge la necesidad de profundizar la discusión sobre el rol de la RDC para alcanzar los objetivos trazados en el Acuerdo de París, así como su potencial, limitaciones y los riesgos asociados a su implementación a gran escala. Este documento busca sintetizar algunos de los principales puntos de debate que giran alrededor de la RDC y discutir el rol de los esquemas de compensación (mercados de carbono) en un momento en el cual la necesidad de abordar la reducción de las emisiones de GEI se torna cada vez más urgente.

Lejos de brindar un análisis exhaustivo, se espera que este documento sirva como disparador para una mayor reflexión, evaluación y promoción de pensamiento crítico y estratégico en torno a estos enfoques, como parte de los procesos de elaboración de las políticas climáticas nacionales.

Entendiendo la dinámica del problema

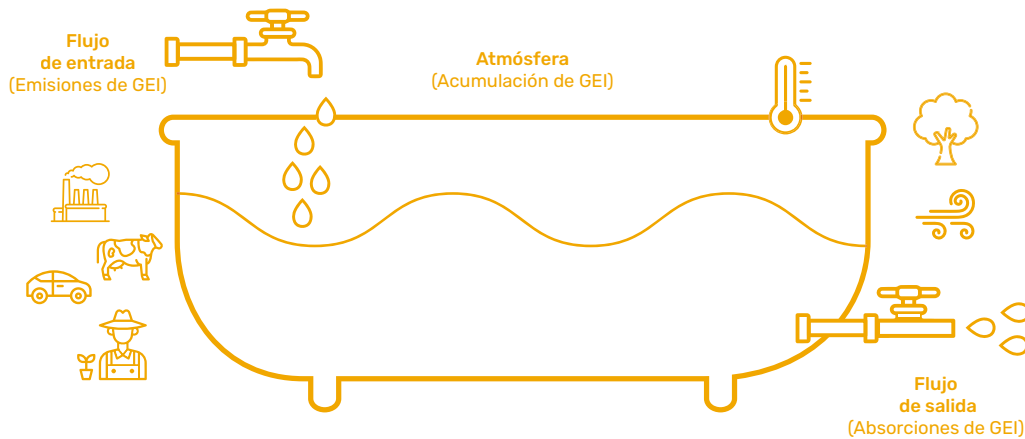
La actual crisis climática es, de manera incuestionable, producto de la **acumulación** de gases de efecto invernadero en la atmósfera emitidos por las actividades humanas (IPCC, 2021). Los GEI —como el dióxido de carbono (CO₂), el metano y el óxido nitroso— atrapan el calor en la atmósfera terrestre, provocando el calentamiento global y cambios en el clima. A mayor concentración de GEI en la atmósfera, más se calienta el planeta y más graves se vuelven los impactos y consecuencias del cambio climático para las personas y los ecosistemas naturales en todo el mundo.



Estos gases pueden permanecer en la atmósfera durante mucho tiempo; algunos, como el CO₂, durante cientos o incluso miles de años (Archer *et al.*, 2009). Esto significa que aunque la humanidad lleve a cero sus emisiones hoy, los gases que ya se liberaron a la atmósfera seguirán atrapando calor y calentando la Tierra durante mucho tiempo. En pocas palabras, **el cambio climático es irreversible en escalas de tiempo de siglos a milenios**.

La dinámica del problema puede entenderse con la analogía propuesta por Sweeney y Sterman (2000) que invita a pensar en la atmósfera como una bañera llenándose de agua (Figura 1). El flujo de entrada (canilla) representa las emisiones de GEI humanas —producto de la quema de combustibles fósiles, la agricultura industrial, cambios en el uso del suelo y otras actividades—, mientras que el flujo de salida (desagüe) representa el pequeño porcentaje de emisiones que los ecosistemas naturales, el océano y algunas intervenciones humanas son capaces de absorber¹.

Figura 1. Diagrama que ilustra la dinámica de la acumulación de las emisiones de GEI en la atmósfera



Fuente: elaboración propia a partir de Sweeney y Sterman (2000).

En la medida en que el flujo que entre a la bañera sea mayor que el de desagüe, el nivel del agua seguirá aumentando hasta rebasar. El punto de rebasamiento puede interpretarse como superar el umbral de aumento de temperatura media global de 1,5 o 2 °C que establece el Acuerdo de París. Cuanto mayor sea el caudal de entrada, más rápido se llenará la bañera. La única manera de evitar un rebasamiento es cerrando la canilla hasta que la velocidad a la que se llena equipare a la velocidad a la que se vacía (cuando el flujo de entrada sea igual al flujo de salida).

De la misma manera, para frenar el aumento de la temperatura media global es necesario **estabilizar las concentraciones de CO₂ y de los otros gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre**. Estas concentraciones sólo lograrán estabilizarse cuando las emisiones antropogénicas de GEI se reduzcan hasta igualar las absorciones antropogénicas², lo que se conoce también como alcanzar un punto de **“emisiones netas cero”** o de **“carbono neutralidad”**.

1. Vale aclarar que, a diferencia de un desagüe, la capacidad del océano y los ecosistemas naturales de absorber CO₂ de la atmósfera no es ilimitada, sino que está cerca de llegar a su punto de saturación.

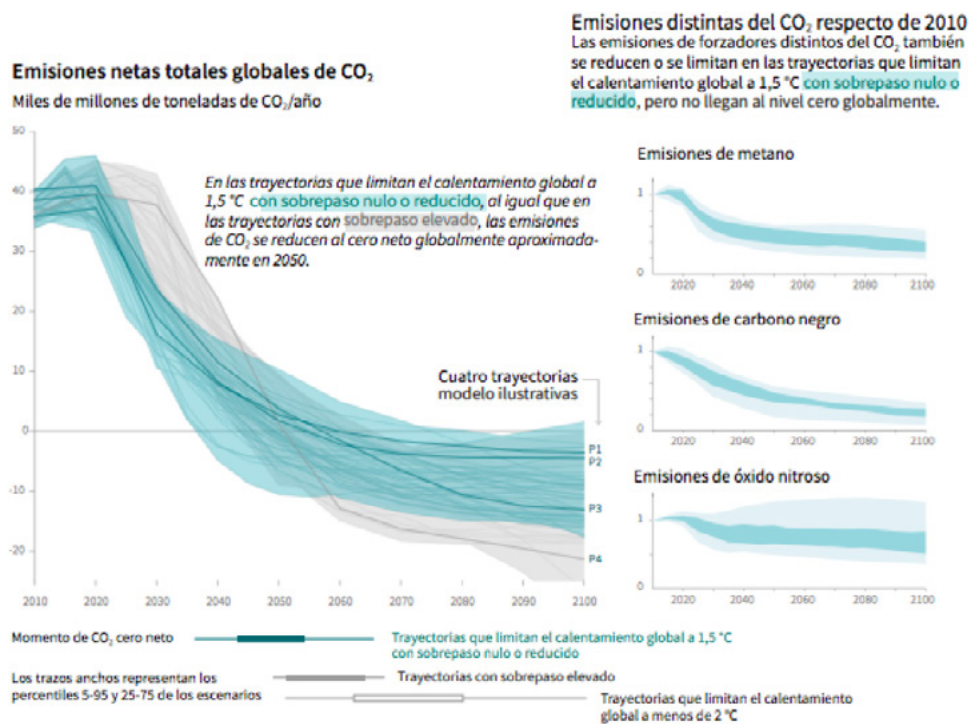
2. Las absorciones antropogénicas son todas aquellas intervenciones humanas intencionales que lleven a remover GEI de la atmósfera. No incluyen la absorción natural de CO₂ por parte de los ecosistemas terrestres y el océano.

La remoción de dióxido de carbono y la carbono neutralidad

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por su sigla en inglés) estipula que para limitar el calentamiento global a 1,5 °C es necesario que las emisiones antropogénicas se reduzcan en un 45% para 2030 y se alcance la carbono neutralidad a mediados de siglo (IPCC, 2018) (Figura 2).

Pero solo alcanzar la carbono neutralidad a nivel global no será suficiente sino que, **luego de ese punto, se deberán conseguir “emisiones netas negativas”**, es decir, absorber una mayor cantidad de GEI de la que se emite (IPCC, 2018). Esto se conseguiría implementando métodos que secuestren grandes cantidades de GEI de la atmósfera y los almacenen en depósitos estables, de forma adicional a lo que absorben naturalmente los distintos ecosistemas terrestres y los océanos.

Figura 2. Trayectorias de emisiones globales de GEI compatibles con 1,5 °C de calentamiento global



Fuente: IPCC, 2018.

En otras palabras, todas las trayectorias de emisiones compatibles con 1,5 °C de calentamiento implican, en **primer lugar**, una reducción rápida y drástica de las emisiones de GEI (“cerrar la canilla”) y **complementariamente** emisiones negativas (“agrandar el desagüe”).



Las emisiones negativas que requieren las trayectorias modelo ilustrativas del IPCC se conseguirían principalmente a través de **la remoción de dióxido de carbono** (ver recuadro ¿Qué es la remoción de dióxido de carbono?), siendo las principales técnicas la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BCAC) y la forestación. Estas se utilizarían para contrarrestar las “emisiones residuales” (aquellas consideradas imposibles o más difíciles de evitar) y, en la mayoría de los casos, para poder regresar a un calentamiento global de 1,5 °C en caso de exceder temporalmente este umbral.

¿Qué es la remoción de dióxido de carbono?

El IPCC define a la remoción de dióxido de carbono (RDC) como cualquier “actividad antropógena por la que se remueve CO₂ de la atmósfera y se almacena de forma duradera en reservorios geológicos, terrestres u oceánicos, o en productos” (IPCC, 2018).

La RDC no incluye el secuestro de CO₂ por parte de los sumideros terrestres y oceánicos como parte del ciclo natural del carbono.

A continuación se sintetizan algunas de las principales tecnologías y métodos de RDC, agrupando estos enfoques en dos grandes categorías:

1. RDC convencional: métodos biológicos que capturan y almacenan carbono en la biomasa y el suelo. Abarcan prácticas consolidadas que ya se aplican a gran escala. Suele reportarse en los inventarios de los países bajo el sector de AGSOUT.

- **Forestación o “aforestación”:** plantación de árboles en tierras donde históricamente no existían bosques.
- **Reforestación:** plantación de árboles en áreas que históricamente presentaban bosques.
- **Restauración de bosques y otros ecosistemas:** recuperación de bosques u otros ecosistemas que han sido degradados, dañados o destruidos. Se busca recuperar la estructura, función y la diversidad biológica del ecosistema original, con el objetivo de retornarlo a su trayectoria histórica.
- **Secuestro de carbono en el suelo:** captura biológica de CO₂ mediante diversas prácticas agrícolas y gestión de pasturas.



2. RDC tecnológica: métodos químicos, geoquímicos o biológicos que almacenan el carbono capturado en la litósfera (formaciones geológicas), el océano o en productos. Estos enfoques aún no logran implementarse a escala.

- **Captura directa del dióxido de carbono del aire y almacenamiento (CDCAA):** captura de CO₂ directamente del aire mediante un proceso químico, para su posterior almacenamiento a largo plazo en reservorios geológicos.
- **Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BCAC):** quema de biomasa para la producción de bioenergía en combinación con captura y almacenamiento del CO₂ en reservorios geológicos.
- **Biocarbón o biochar:** procesamiento de biomasa vegetal por medio de la pirólisis y posterior aplicación a los suelos.
- **Meteorización acelerada de rocas y alcalinización oceánica:** captación geoquímica de CO₂ a través de la pulverización de polvo de rocas silicatadas en tierras agrícolas o el océano para acelerar la meteorización.
- **Fertilización oceánica:** adición de nutrientes al océano para estimular la fotosíntesis llevada adelante por el fitoplancton. El Convenio de Londres, el Protocolo de Londres y el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) rechazan este tipo de intervenciones debido a los riesgos de manipular a gran escala los procesos naturales del ecosistema marino.

Los escenarios de 1,5 °C que limitan el rebasamiento demandan entre 30 y 1090 Gt de CO₂ en eliminaciones acumuladas de CO₂ a partir de BCAC y captura directa del CO₂ del aire y almacenamiento (CDCAA) entre 2020 y 2100. Se espera que el sector de agricultura, bosques y otros usos del suelo contribuya con otras 20–400 Gt de CO₂ de eliminaciones adicionales (IPCC, 2022).

Para tener un punto de referencia, la cantidad de RDC que se está llevando adelante actualmente ronda los **2 Gt de CO₂ al año** (Smith *et al.*, 2023). Casi la totalidad de la RCD actual (99,9%) procede de técnicas convencionales terrestres, principalmente de la forestación, la restauración de zonas previamente deforestadas y la gestión de los bosques existentes.

El despliegue de RDC que requerirían las distintas trayectorias de mitigación del IPCC varía y está sujeta al tipo de transformaciones y a la velocidad con la que se lleve adelante la reducción neta de emisiones: cuanto más se posterguen los esfuerzos de mitigación, mayor será la cantidad de RDC necesaria para mantener al planeta por debajo de los 1,5 °C.

En los casos más extremos, se trataría de una enorme escala de absorciones que demandaría una nueva revolución industrial en términos de despliegue de tecnologías, así como de cambios en el uso de la tierra comparables a los que sostienen la producción de alimentos y *commodities* en la actualidad. En el extremo inferior de la escala, las emisiones negativas podrían conseguirse mediante la restauración de bosques y otros ecosistemas degradados.



Si bien el IPCC reconoce en sus reportes que la aplicación de la RDC a gran escala está sujeta a múltiples restricciones de viabilidad y sostenibilidad (IPCC, 2019; IPCC, 2022), sus modelos no incorporan estas consideraciones y asumen implícitamente su factibilidad desde un punto de vista tecnológico, ecológico y socioeconómico.

Esto ha sido ampliamente cuestionado, dado que las trayectorias resultantes **podrían dar lugar a falsas expectativas sobre la posibilidad y viabilidad de desplegar la RDC a escalas gigantescas en el futuro, demorando así los esfuerzos de mitigación** (Dooley y Kartha, 2018; Heck *et al.*, 2018; Deprez *et al.*, 2019; Creutzig *et al.*, 2021; Günther y Ekardt, 2022).

Considerando el peso y la influencia del IPCC en las negociaciones globales sobre cambio climático y en la elaboración de los planes de descarbonización, la enorme dependencia de muchas de las trayectorias modelo en la RDC conlleva importantes riesgos e implicancias políticas. En particular, si esto se traslada a los planes climáticos nacionales y de actores no estatales, o si se utiliza para justificar la continuidad de las emisiones.

La remoción de dióxido de carbono en los compromisos climáticos

Muchos de los planes de descarbonización asumidos por los países bajo el Acuerdo de París se apoyan en un despliegue masivo de métodos de RDC “convencional” que implicarían grandes cambios en el sector de uso del suelo. La superficie total de tierra necesaria para satisfacer la remoción de carbono prevista en estos planes fue estimada en casi **12 millones de km², un área equivalente a más de cuatro veces la Argentina** (Dooley *et al.*, 2022a).

De esta superficie, unos 6,33 millones de km² (más de la mitad) se destinaría a la forestación y en menor medida a la BCAC, mientras que la restauración de tierras degradadas (incluyendo agroforestería y restauración de bosques) supondría unos 5,51 millones de km² del total.

A este campo ya abarrotado de iniciativas y objetivos relacionados con el sector forestal y la plantación de árboles se suman los compromisos del sector privado. Por ejemplo, la estrategia de la empresa Shell para alcanzar emisiones netas cero en 2050 incluye un abanico de soluciones basadas en la naturaleza³. Mastercard, por su parte, lanzó una campaña para plantar 100 millones de árboles en cinco años⁴ y Microsoft se comprometió a plantar 250.000 árboles en 2020⁵ (aún no se alcanzó a completar la cifra proyectada). Además, se destaca la plataforma Trillion Trees⁶, presentada en el Foro Económico Mundial de Davos en enero de 2020.

Todos estos compromisos e iniciativas plantean enormes interrogantes respecto a la disponibilidad de superficie terrestre, la viabilidad y los impactos socioambientales de estas estrategias en su conjunto.

3. Ver: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/new-energies/nature-based-solutions.html>

4. Ver: <https://www.mastercard.com/news/press/2022/april/mastercard-expands-the-priceless-planet-coalition-s-forest-restoration-effort/>

5. Ver: <https://about.ads.microsoft.com/en-us/blog/post/april-2020/sustainability-update-creating-a-greener-future-one-tree-at-a-time>

6. Ver: <https://www.ft.org/>



Por su parte, la Argentina, en su segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por su sigla en inglés) –el compromiso climático a 2030 asumido por el país bajo el Acuerdo de París– se comprometió a no exceder la emisión neta de 349 MtCO₂eq para 2030 (MAyDS, 2021).

A través del Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático (PNAyMCC) se plantean algunas medidas de RDC en pos de alcanzar la meta de mitigación a 2030 (MAyDS, 2022). Aunque en el Plan no se aborda la RDC de forma explícita, entre las principales medidas que contribuirían al secuestro de carbono se mencionan la restauración y conservación de ecosistemas, la rotación de cultivos (ninguna de las cuales está cuantificada) y dar un mayor impulso a la forestación. Esta última medida prevé aumentar para ese año la superficie forestada de coníferas, eucaliptos, salicáceas y otras especies (nativas y exóticas) a 1,6 millones de ha. Supondría una superficie adicional de 220.000 ha respecto a la de 2018, e implicaría una contribución a la reducción de emisiones netas de 3,8 MtCO₂e en 2030.

En 2022, la Argentina formalizó ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) su compromiso de alcanzar la neutralidad en emisiones de GEI para el año 2050⁷. Una meta aplicable a todos los sectores de la economía y que se alcanzaría “mediante la reducción progresiva de las emisiones de GEI y la promoción y fortalecimiento de los sumideros”.

Para alcanzar este objetivo, el país se comprometió a través de ese documento a entablar un proceso de planificación participativo para la formulación de las trayectorias y la estrategia de desarrollo resiliente con bajas emisiones a largo plazo (ELP) a 2050. Es en este marco temporal en el que los debates sobre el potencial y las implicancias de la RDC cobran una mayor relevancia.

Limitaciones, consideraciones y riesgos de la remoción de dióxido de carbono

En esta sección se resumen algunas de las principales consideraciones, limitaciones y riesgos en torno a distintos métodos de RDC, con particular énfasis en aquellos enfoques que predominan en los escenarios de mitigación del IPCC y en los planes climáticos estatales y no estatales.

La viabilidad y la magnitud de los impactos asociados a las distintas estrategias de RDC dependen de muchos factores –incluyendo la escala de implementación, los tipos de manejo asociados y los contextos territoriales, entre otros– y es algo que debería analizarse rigurosamente en el marco de la elaboración de los escenarios y políticas climáticas.

Disponibilidad de tierras y competencia con otros usos del suelo

En la actualidad, más del 70% de la superficie terrestre está siendo utilizada por los seres humanos, causando una degradación ambiental sin precedentes y contribuyendo de forma significativa al calentamiento global (IPCC, 2019). La remoción de carbono a partir de métodos que requieren grandes cambios en el uso del suelo corre el riesgo de exacerbar estas tendencias y comprometer otros objetivos de desarrollo sostenible.

7. Ver: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/estrategia_de_desarrollo_resiliente_con_bajas_emisiones_a_largo_plazo_2050.pdf



En un contexto en el que el actual uso de la tierra y de los ecosistemas naturales ya está a punto de traspasar varios límites planetarios, cualquier expansión adicional de las tierras de cultivo implica transgredir importantes umbrales de sostenibilidad⁸. Incluso muchos estudios que afirman identificar “zonas disponibles” para la RDC terrestre suelen ignorar los usos y usuarios existentes –como por ejemplo el pastoralismo y los territorios ancestrales– de estas zonas (Young, 1999). Esto sugiere que no habría tierras “de sobra” que podrían destinarse a cultivos bioenergéticos o plantaciones de árboles para la RDC sin competir con otros usos.

La forestación y la producción de biomasa para BCAC a grandes escalas podrían llevar a una mayor conversión de tierras –tanto de forma directa como indirecta– y competir con la producción de alimentos y otros usos del suelo (Deprez *et al.*, 2019; Creutzig *et al.*, 2021). Esto podría tener impactos muy negativos para la seguridad hídrica y alimentaria, la biodiversidad, y llevar a una mayor desestructuración de los modos de vida indígenas y campesinos, entre otras consecuencias socioambientales (Heck *et al.*, 2018; Creutzig *et al.*, 2021; IPCC, 2022).

Teniendo en cuenta esta limitante, **los esfuerzos de mitigación en el sector de AGSOUT serían más eficaces y virtuosos si persiguieran la consecución de múltiples objetivos de sostenibilidad en simultáneo**, en lugar de centrarse exclusivamente en la eliminación del dióxido de carbono (Dooley *et al.*, 2022a). Por ejemplo, la RDC a partir de la restauración de bosques y otros ecosistemas naturales, así como de tierras productivas degradadas, puede aportar a conseguir emisiones negativas sin generar una demanda adicional de tierras, contribuyendo al mismo tiempo a la protección de la biodiversidad, la adaptación al cambio climático y a otros objetivos de sostenibilidad.

Permanencia y temporalidad

Un aspecto clave a considerar es que, a diferencia de la captura y el almacenamiento de carbono en reservorios geológicos, **el almacenamiento de carbono en reservorios biológicos corre el riesgo de no ser permanente**. Es decir, que el carbono capturado en la biomasa y los suelos puede volver a la atmósfera como consecuencia de acciones humanas directas y/o por los crecientes impactos climáticos, siendo los mayores riesgos las perturbaciones naturales –como los incendios y plagas–, las tormentas, las sequías y la deforestación.

El IPCC (2021) y otros marcos de contabilidad de carbono definen como permanente la eliminación de CO₂ con una duración superior a cien años. Sin embargo, el CO₂ persiste en la atmósfera durante mucho más tiempo, del orden de decenas de miles de años. Por tanto, almacenar CO₂ durante un siglo no debería considerarse como una eliminación de CO₂ de forma permanente (Archer *et al.*, 2009; Chiquier *et al.*, 2022).

Los enfoques actuales de la contabilidad tampoco reconocen cómo el riesgo de pérdida de las reservas de carbono varía ampliamente en función de la integridad del ecosistema (Keith *et al.*, 2021). En cambio, consideran que el carbono es fungible y suponen que todas las reservas de carbono tienen la misma estabilidad, longevidad y capacidad de recuperación.

⁸ Se estima que la cantidad total de superficie terrestre que podría destinarse para cultivos sin superar los límites de sostenibilidad ambiental se encuentra entre 11 a 15 millones de km² (Willett *et al.*, 2019). En 2022, la superficie total de tierras cultivadas a nivel mundial se estimó en 15,61 millones de ha (FAOSTAT, 2020).



Sin embargo, la restauración de bosques y otros ecosistemas degradados y su protección continua permite minimizar los riesgos de reversión de la RDC ya que mejora la resiliencia de estos ecosistemas frente a factores de estrés externos (Seddon *et al.*, 2019; Lewis *et al.*, 2019).

Las plantaciones forestales en base a pocas especies y/o especies exóticas –aunque pueden contribuir a las economías locales– almacenan mucho menos carbono que los bosques naturales, son más susceptibles a perturbaciones externas, y su cosecha y raleo devuelven periódicamente a la atmósfera parte del CO₂ almacenado (Lewis *et al.*, 2019). Además, requieren abordar su gestión a largo plazo dado que la permanencia de la RDC está sujeta a la viabilidad económica de las plantaciones en el futuro.

Otro punto a considerar a la hora de analizar la contribución neta de las estrategias de RDC reside en si estos enfoques desplazan las reservas de carbono terrestre existentes, resultando en emisiones de carbono que pueden ser superiores a las eliminadas (Davies-Barnard *et al.*, 2015).

Por otro lado, se debe tener en cuenta la **temporalidad** de las estrategias de RDC; esto es, el tiempo que transcurre desde su implementación hasta la eliminación efectiva de CO₂ para tener un impacto significativo sobre el sistema climático o la consecución de un objetivo de mitigación (Chiquier *et al.*, 2022).

Uno de los desafíos que plantea la RDC a través de la forestación, reforestación y restauración es que estos procesos llevan décadas. Por ejemplo, aunque la restauración de bosques es fundamental para la consecución de múltiples objetivos socioambientales y puede aportar importantes beneficios de mitigación a largo plazo, no llegaría a implementarse con la suficiente rapidez como para reducir notablemente las temperaturas máximas globales previstas para las próximas décadas (Dooley *et al.*, 2022b).

En concreto, **la RDC, aunque importante, no puede reemplazar la necesidad de reducir drásticamente las emisiones en la próxima década** para evitar superar varios puntos de no retorno del sistema terrestre. Dado que el calentamiento global depende del tiempo de permanencia de las moléculas de GEI en la atmósfera, evitar las emisiones ahora es más importante y asequible que eliminarlas más adelante.

Impactos sobre la biodiversidad

El cambio en el uso de la tierra es el principal impulsor de la alarmante pérdida de biodiversidad (IPBES, 2019). En las últimas décadas se ha visto un aumento en la conversión de bosques y pastizales naturales en monocultivos de pinos o eucaliptos en la Argentina (Jobbagy *et al.*, 2005; Zurita *et al.*, 2006). La expansión de la bioenergía también puede impulsar la conversión directa de hábitats autóctonos en tierras de cultivo o promover indirectamente la deforestación en otros lugares, exacerbando la pérdida de biodiversidad incluso a niveles más altos que en un escenario contrafactual de mayor cambio climático (Hof *et al.*, 2018; Creutzig *et al.*, 2021; Hanssen *et al.*, 2022).

Al problema de la conversión de tierras se suman también otros impulsores directos. La agricultura y la silvicultura son introductores clave de especies exóticas e invasoras que desestabilizan ecosistemas autóctonos y generan mermas en la biodiversidad (Yansen y Biganzoli, 2022). La intensificación del uso de la tierra y la agricultura convencional dependen, además, de la aplicación de agroquímicos como pesticidas, herbicidas y fertilizantes sintéticos, que tienen impactos devastadores para la diversidad biológica y las funciones ecosistémicas (Devi *et al.*, 2022; IPBES, 2019).



En cambio, como se mencionó anteriormente, el fortalecimiento de los sumideros naturales de carbono a través de la restauración ecológica de bosques nativos y otros ecosistemas es un enfoque que trae importantes beneficios para la biodiversidad. Además, permitiría recuperar servicios ecosistémicos que son vitales para reducir vulnerabilidades y aumentar la resiliencia frente a los crecientes impactos climáticos (Pörtner *et al.*, 2021).

Considerar cuidadosamente los impactos tanto positivos como negativos de cada enfoque sobre la biodiversidad y las funciones ecosistémicas a la luz de los contextos regionales y locales debería ser un componente fundamental en la planificación y la gobernanza en materia de RDC. Esto contribuiría a alinear los objetivos y estrategias nacionales bajo el Convenio sobre la Diversidad Biológica y aquellos bajo la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, para garantizar una mayor coherencia y minimizar impactos adversos.

Riesgos en torno a la compensación de emisiones como estrategia de mitigación

La compensación de emisiones se basa en la premisa de que es posible neutralizar las emisiones de GEI que ocurren en un lugar o sector a través de reducciones en otro⁹. Los mecanismos de compensación —principalmente en forma de mercados de carbono— están ganando cada vez más relevancia en las estrategias de mitigación de gobiernos y actores no estatales.

Estos esquemas ofrecen la posibilidad a países, empresas y otras entidades de compensar sus emisiones financiando proyectos de: (1) **reducción de emisiones**, (2) **emisiones evitadas**, y (3) **remoción de dióxido de carbono**.

Históricamente, los créditos de carbono del sector forestal y de agricultura se han mantenido al margen de los principales mercados de carbono¹⁰. Esto es debido al importante grado de incertidumbre inherente a la cuantificación de las emisiones y absorciones en estos sistemas, los riesgos de reversión (impermanencia) y de que las emisiones sean desplazadas hacia regiones fuera del área de un proyecto (fugas). Sin embargo, la cantidad de este tipo de proyectos está creciendo cada vez más dentro del mercado voluntario (MVC). A modo de referencia, el número de créditos provenientes de proyectos del sector forestal en el mercado voluntario de carbono se elevó de 57,8 millones en 2020 a 227,7 millones en 2021 (Ecosystem Marketplace, 2022).

En la Argentina, se evidencia un creciente interés de parte de varias jurisdicciones, actores y sectores —en particular los sectores forestal y ganadero— por insertarse en los mercados de carbono como vendedores de créditos¹¹, así como se observa un marcado aumento de iniciativas que ofrecen servicios de medición y compensación de la huella de carbono.

9. Se sugiere la lectura del documento "Glosario de mercados de carbono. Explicaciones y términos básicos para desterrar confusiones" (Gonda, 2022).

10. La forestación o reforestación fueron las únicas actividades elegibles bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto, pudiendo emitir unidades que expiraban al final del primer período de compromiso (tCERs) o al finalizar el proyecto (ICERs).

11. <https://www.argentinaforestal.com/2022/05/13/mesa-de-carbono-forestal-nacional/>
<https://macs.com.ar/la-ganaderia-argentina-captura-carbono-y-genera-creditos-para-otras-industrias/>



Muchos actores ven en los mercados de carbono una oportunidad de financiamiento para la conservación y restauración de bosques, la promoción de mejores prácticas agrícolas y otro tipo de actividades que acarreen resultados de mitigación. Otros, en cambio, ven en las compensaciones una estrategia eficaz y más accesible para cumplir con sus objetivos de carbono neutralidad.

Sin embargo, los mercados de carbono y los marcos de compensación existentes rara vez han conseguido las reducciones de emisiones que prometían (Cames *et al.*, 2016; Calel *et al.*, 2021). Estos esquemas constituyen, en definitiva, un instrumento de contabilidad de emisiones que parte de muchos supuestos y equivalencias que no necesariamente responden a las dinámicas físicas del ciclo de carbono y del cambio climático, ni reflejan lo que realmente termina percibiendo la atmósfera (Mackey *et al.*, 2013; Carton *et al.*, 2021).

Entre las equivalencias se incluyen las geográficas, temporales y también entre *stocks* de carbono, dando lugar a la idea de que cualquier tonelada de CO₂ puede considerarse como funcionalmente equivalente sin importar cómo, dónde o cuándo se evite, elimine o almacene (Carton *et al.*, 2021). A continuación se sintetizan algunas de las principales discusiones, preocupaciones y riesgos asociados a los esquemas de compensación.

Las compensaciones no abordan el problema de fondo

El presupuesto de carbono restante para evitar exceder los 1,5 °C —es decir, la cantidad de CO₂ que aún puede emitirse para tener un 50% de posibilidades de que se mantenga por debajo de 1,5 °C el calentamiento global— es de 380.000 millones de GtCO₂ (Global Carbon Budget, 2022). Al ritmo actual de emisiones, se calcula que este presupuesto se agotaría en sólo nueve años a partir de 2023.

La compensación de emisiones por sí sola no conduce a una reducción neta de la cantidad de GEI que se emiten a la atmósfera, sino que, en el mejor de los casos, contribuye a neutralizar una parte de las emisiones.

Frente a este panorama, **surge como interrogante el rol que pueden llegar a jugar las compensaciones de carbono en un contexto en el que todavía estamos a un abismo de alcanzar niveles de emisiones cercanos a cero como para comenzar a compensar emisiones residuales**. A esto se suma otra capa de complejidad, dado que las “emisiones residuales” no suelen estar claramente definidas ni conceptual ni cuantitativamente, dando lugar a criterios arbitrarios respecto a qué tipo de emisiones y qué actividades son realmente difíciles de mitigar y deben ser compensadas (Buck *et al.*, 2022).

Asimismo, a la luz de la insuficiencia de los compromisos de mitigación actuales (UNEP, 2022), las emisiones negativas se vuelven cada vez más cruciales como estrategia **complementaria** a la reducción de emisiones, en lugar de un sustituto. Por lo tanto, si sectores como el energético o el industrial utilizan la RDC del sector de AGSOUT para compensar y sostener sus emisiones, se licúa la capacidad de secuestro de carbono disponible para cumplir con las metas del Acuerdo de París y regresar la temperatura media global hacia niveles más seguros en caso de rebasamiento.

El sector de AGSOUT representa una fuente neta de emisiones —esto es, considerando emisiones y absorciones exclusivamente generadas como resultado de las actividades humanas. Aporta aproximadamente un 20% de las emisiones de GEI a nivel global (IPCC, 2019), y en la Argentina es responsable de un 39% de las emisiones nacionales (MAyDS, 2021b). Es un sector que por sí solo requiere descarbonizarse, transicionar hacia prácticas más sustentables y minimizar su enorme impacto sobre la biodiversidad.



Teniendo en cuenta las emisiones históricas, la RDC en el sector de AGSOUT a través de mejores prácticas, nuevos sumideros y la restauración sólo **repone el carbono perdido en el pasado producto de la deforestación y degradación de los bosques, humedales, pastizales y suelos**. Considerando además la degradación y los usos actuales de la tierra, es imposible pensar que se podrán recuperar por completo las reservas originales de carbono terrestre (Mackey *et al.*, 2013). Por lo tanto, esta deuda de emisiones del sector no da margen para que absorba también los aportes adicionales de carbono fósil.

Por último, la proliferación de las iniciativas de compensación –al ofrecer una presunta alternativa mucho más económica y sencilla que la reducción de emisiones– incentiva al reemplazo y retraso de las reducciones de emisiones y de los cambios en los niveles y patrones de consumo tan necesarios en la próxima década.

La compensación utilizada para etiquetar productos o servicios como “carbono neutros” no solo es capciosa, sino que también tiene implicancias en cuanto a la respuesta y comportamiento de los consumidores, con consecuencias para abordar la mitigación desde el lado de la demanda.

Las emisiones provenientes de los combustibles fósiles no son equivalentes a las del uso de la tierra

El ciclo del carbono es el proceso natural por el cual el carbono circula a través de los sistemas terrestres, incluyendo la atmósfera, los océanos, los organismos vivos (biósfera) y los depósitos geológicos.

Las plantas y bacterias absorben el dióxido de carbono de la atmósfera durante la fotosíntesis y lo transmiten al resto de los organismos vivos a lo largo de la cadena alimenticia. Cuando las plantas y los animales mueren, sus cuerpos se descomponen y liberan el carbono nuevamente a la atmósfera. Esto se conoce como “carbono biogénico”.

El “carbono fósil”, por otra parte, ha estado almacenado bajo tierra durante millones de años, en forma de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas. Al quemar combustibles fósiles, este carbono se suma al que ya circula por el sistema terrestre, alterando el equilibrio y provocando el cambio climático.

La diferencia entre el carbono biogénico y el fósil es significativa porque el carbono biogénico forma parte de un ciclo corto natural, mientras que el fósil lleva millones de años almacenado y recientemente se comenzó a liberar a la atmósfera por las actividades humanas.

En otras palabras, una tonelada de CO₂ biogénico y una tonelada de CO₂ fósil tienen orígenes, edades y ciclos diferentes, contribuyendo al cambio climático de formas distintas y, por lo tanto, no deberían ser fungibles (Mackey *et al.*, 2013). Por ende, los esfuerzos de mitigación en el sector de AGSOUT deben acompañar, pero no sustituir, las reducciones de emisiones en el sector energético, que es el que actualmente continúa aumentando la carga global de carbono en la atmósfera.

Falta de integridad de los créditos de carbono

En principio, la adicionalidad, las líneas de base, la cuantificación de las reducciones de emisiones, la permanencia y las fugas son criterios centrales a la hora de determinar la integridad de los créditos de carbono (Gonda, 2022). Sin embargo, estos parámetros son difíciles de estimar, verificar y garantizar cuando se trata de sistemas biológicos complejos.



La falta de transparencia, la ausencia de mecanismos de rendición de cuentas y la complejidad de los mercados y registros hacen que la evaluación de la calidad de las compensaciones sea extremadamente difícil. Las crecientes revelaciones sobre la falta de adicionalidad de muchos créditos REDD+¹² deja ver los problemas que supone garantizar algunos principios básicos de integridad para este tipo de créditos, incluso para los programas y estándares más importantes del mercado.

Estas complejidades metodológicas corren el riesgo de generar incentivos que favorezcan más a la RDC en el corto plazo (por ej.: plantaciones forestales) que las emisiones evitadas (por ej.: conservación de bosques), dado que resulta más sencillo demostrar su adicionalidad y estimar los resultados de mitigación. Esto es a pesar de que el mayor valor y potencial de mitigación se encuentra en la protección de los bosques y otros reservorios naturales de carbono en pie (Mackey *et al.*, 2020; IPCC, 2022).

Además de estos desafíos técnicos, existen importantes preocupaciones ambientales y sociales que hacen especialmente difícil abordar las emisiones del sector de AGSOUT a través de los mercados de carbono. Algunos proyectos han resultado en el avasallamiento de derechos humanos, el desplazamiento forzado de comunidades de sus territorios y otros impactos socioambientales (Ervine, 2013). A pesar de ello, gran parte de estos mercados aún carecen de salvaguardas sólidas, genuinos procesos de consulta y participación efectiva, así como también se caracterizan por la ausencia de mecanismos independientes para la reparación de agravios.

Frente a estos desafíos, diversos actores del mercado voluntario y la sociedad civil plantean la **necesidad de un cambio de paradigma respecto a la lógica de compensación**, y proponen una alternativa a los créditos de carbono convencionales: unidades de “contribución” o de “impacto” (Carbon Market Watch, 2020; WWF, 2022; Gold Standard, 2022). De forma simplificada, en lugar de que una entidad pueda afirmar que compensa sus emisiones o que sus productos y servicios son neutros en carbono, podría expresar su contribución a los esfuerzos de mitigación de un país determinado mediante el apoyo financiero a un proyecto climático.

Esto les permitiría a las empresas apoyar los objetivos climáticos nacionales a través de la arquitectura actual del mercado voluntario a cambio de certificados de impacto, sin transferir las reducciones de emisiones para compensar sus propias emisiones. Las unidades de contribución ayudarían, además, a sortear muchos de los desafíos antes mencionados y evitar conflictos de atribución y doble contabilización de las emisiones.

Justicia climática y profundización de desigualdades

La creación de sistemas de comercio de emisiones a nivel global abre la puerta al intercambio internacional de responsabilidades de mitigación, permitiendo a los países y a las empresas financiar esfuerzos climáticos en otros lugares —por lo general en países del Sur Global y a costos muy bajos— para poder compensar sus emisiones y así cumplir con sus objetivos.

Esto se basa en otro tipo de equivalencia: aquella entre las emisiones y absorciones de carbono alcanzadas en diferentes zonas geográficas, es decir, en lugares que difieren mucho en cuanto a sus características biofísicas, políticas y socioeconómicas. Las diferencias que permiten estos intercambios comerciales muchas veces reflejan asimetrías en las capacidades, oportunidades y relaciones de poder en un mundo

12. Ver: <https://www.theguardian.com/environment/2023/jan/18/revealed-forest-carbon-offsets-biggest-provider-worthless-verra-aoe>



profundamente desigual. Por tanto, centrarse en la rentabilidad como criterio para definir dónde deberían enfocarse los esfuerzos de mitigación tenderá, entre otras cosas, a reproducir estas desigualdades estructurales (Fairhead *et al.*, 2012).

Esto termina exacerbando la injusticia climática de varias maneras. En primer lugar, priva a los países y regiones del Sur Global de aquellas opciones de mitigación y RDC más accesibles, mientras que les ofrece a las naciones y entidades con mayor responsabilidad histórica y más acaudaladas un camino más fácil y económico para la consecución de sus compromisos climáticos. En segundo lugar, pone en riesgo las oportunidades de subsistencia de los sectores de la población más vulnerables y marginalizados (especialmente en regiones rurales) para que una élite mundial pueda sostener sus niveles actuales de consumo. Y, en tercer lugar, legitima la continuidad de las emisiones fósiles a la atmósfera, contribuyendo así a pérdidas y daños climáticos cada vez más graves e irreversibles que terminarán afectando en mayor medida a las personas más vulnerables y que menos contribuyeron al problema (Carton *et al.*, 2021).

Conclusiones y recomendaciones

Evitar superar el umbral crítico de 1,5 °C de temperatura media global requiere ineludiblemente que el mundo alcance la carbono neutralidad a mediados de siglo y, de forma complementaria, emisiones negativas netas durante la segunda mitad.

En la actualidad, las opciones tecnológicas (no convencionales) con mayor potencial para la remoción de GEI de la atmósfera aún se encuentran en fase piloto y podrían no resultar viables en última instancia. Por otro lado, **la cantidad de RDC convencional que podría implementarse en el sector de AGSOUT a la velocidad requerida y sin poner en riesgo otros criterios de sostenibilidad es limitada.**

A esto se suma la tendencia de que gran parte de la RDC que tiene lugar hoy en día está siendo reclamada por varios actores a través de los mercados de carbono, tanto en el mercado voluntario como próximamente bajo los enfoques cooperativos del artículo 6 del Acuerdo de París. Si esta capacidad de RDC se utiliza para compensar emisiones actuales o “residuales” de forma indiscriminada, no quedaría disponible para eliminar el carbono heredado o para hacer frente a un rebasamiento de la temperatura.

En otras palabras, **si la RDC es un recurso con capacidad finita, las decisiones que toma un país al asignar este recurso tienen implicancias no sólo climáticas sino también en términos de justicia global.** En este sentido, algunos plantean que las emisiones residuales podrían llegar a constituir un nuevo punto de disputa en las negociaciones de cambio climático bajo la CMNUCC (Buck *et al.*, 2023).

En este contexto, resulta fundamental llevar adelante una planificación anticipada y conservadora de la RDC, así como una gestión responsable de la capacidad disponible y proyectada, ponderando cuidadosamente los riesgos y beneficios de cada enfoque desde una visión integral de sostenibilidad y equidad.

En el marco de la elaboración, revisión e implementación de las estrategias e instrumentos nacionales de cambio climático (NDC, ELP, PNAyMCC) se proponen una serie de recomendaciones:

- **Priorizar la reducción directa de emisiones en el corto y mediano plazo para minimizar la dependencia en la RDC a futuro.**



- **Llevar adelante una planificación anticipada de la RDC** para contrarrestar aquellas emisiones identificadas como residuales en el largo plazo. Esta planificación debería contemplar además la gestión sostenida de la RDC en el tiempo, para evitar que el carbono secuestrado vuelva a la atmósfera.
- **Elaborar modelos y herramientas de evaluación multicriterio** que contribuyan a identificar las implicancias socioambientales de los métodos disponibles, ponderando los riesgos, costos, desafíos y los beneficios de las distintas opciones de RCD en los contextos y escalas de su implementación.
- **En el sector de AGSOUT, priorizar aquellos enfoques de RDC con el potencial de contribuir a múltiples objetivos de desarrollo sostenible y que corran el menor riesgo de reversión**, en lugar de aquellos centrados primordialmente en la eliminación rápida de CO₂ y/o su almacenamiento en reservorios temporales.
- **Desglosar la meta de neutralidad de emisiones de la estrategia de largo plazo en objetivos separados para el sector energético y el sector de AGSOUT.** Esto restringiría las absorciones sobre una base sectorial, incentivando la reducción directa de emisiones en ambos sectores (Mc Laren *et al.*, 2019). Una separación de objetivos evitaría además trasladar la carga de la mitigación del sector energético al sector de AGSOUT, minimizando los riesgos de una sobredependencia en la RDC terrestre, que acarrea múltiples incertidumbres y riesgos socioambientales (Upton, 2019).
- **Definir criterios claros para delimitar y estimar las emisiones residuales.** La transparencia en torno a cómo y por qué las emisiones llegan a considerarse residuales es fundamental para la legitimidad de los esfuerzos de descarbonización. Esto es necesario también para poder calibrar expectativas y planificar estrategias de RDC de manera acorde.
- En el marco de las negociaciones bajo el artículo 6 del Acuerdo de París y la elaboración de la Estrategia Nacional para el uso de Mercados de Carbono¹³, se recomienda **promover y facilitar un cambio de paradigma hacia el uso de unidades de “contribución”**. Más allá de un cambio de retórica, esta alternativa permitiría financiar mejores prácticas en lugar de resultados de mitigación que pueden no ser permanentes o estar sobrevalorados. Esto es particularmente adecuado para actividades en el sector de AGSOUT. Además, permitiría sortear los principales problemas asociados a los esquemas de compensación sintetizados en este documento, incluyendo la doble contabilidad de los resultados de mitigación.
- En línea con el punto anterior, **establecer criterios o estándares mínimos para los tipos de afirmaciones que pueden realizar las empresas respecto al impacto climático de sus servicios y productos** –como, por ejemplo, a través del Sistema de Fiscalización de Rótulos y Etiquetas (SIFIRE), de la Secretaría de Comercio Interior¹⁴. Esto ayudaría a prevenir ambigüedades o engaños en la veracidad de la información sobre su impacto en términos de mitigación, contribuyendo a la transformación de las prácticas de consumo y a acelerar los procesos de descarbonización desde la demanda.

Dada la transversalidad y el alcance de los riesgos de la RDC, estas decisiones deben tomarse en el marco de un proceso abierto, transparente y democrático. La planificación y ejecución de estos enfoques debe garantizar el pleno respeto por los derechos de acceso a la información pública, la participación ciudadana y el acceso a la Justicia en asuntos ambientales consagrados en la legislación nacional y en el Acuerdo

13. La elaboración de dicha estrategia está prevista en el PNAyMCC.

14. <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/242533/20210331>



de Escazú. En particular, deben garantizar el pleno respeto por los derechos de las comunidades locales y los pueblos indígenas, incluyendo el de consulta y consentimiento libre, previo e informado, así como sus derechos a la tierra y territorios.

Por último, será fundamental promover mayores esfuerzos para identificar y cerrar algunas brechas de conocimiento existentes a la vez de profundizar estos debates entre una mayor diversidad de actores.

Referencias

Archer, D. *et al.* (2009). Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 37, 117-34.

Astudillo, A. *et al.* (2014). Evaluating Carbon Footprint Behavior in the Agriculture and Energy Sectors: A Review. *Sistemas y Telemática*. 12. 35. <https://doi.org/10.18046/syt.v12i31.1914>

Buck, H. J. *et al.* (2023). Why residual emissions matter right now. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01592-2>

Calel, R. *et al.* (2021) Do carbon offsets offset carbon? Centre for Climate Change Economics and Policy Working Paper 398/Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper 371. London: London School of Economics and Political Science. Disponible en: http://eprints.lse.ac.uk/112803/1/GRI_do_carbon_offsets_offset_carbon_paper_371.pdf

Cames *et al.* (2016). How additional is the Clean Development Mechanism? Analysis of the application of current tools and proposed alternatives. CLIMA.B.3/SERI2013/0026r. Preparado para DG Clima por Oko-Institut, INFRAS, Stockholm Environment Institute (SEI), Berlin. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/system/les/2017-04/clean_dev_mechanism_en.pdf

Carbon Market Watch (2020). Above and Beyond Carbon Offsetting: Alternatives to compensation for climate action and sustainable development. Disponible en: <https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2020/12/Above-and-beyond-carbon-offsetting.pdf>

Carton, W. *et al.* (2021). Undoing Equivalence: Rethinking Carbon Accounting for Just Carbon Removal. *Front. Clim.* 3:664130. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.664130>

Chiquier, S.; Patrizio, P.; Bui, M.; Sunny, N. y Mac Dowell, N. (2022). A comparative analysis of the efficiency, timing, and permanence of CO₂ removal pathways. *Energy Environ Sci* 15:4389-4403. <https://doi.org/10.1039/D2EE01021F>

Creutzig, F. *et al.* (2021). Considering sustainability thresholds for BECCS in IPCC and biodiversity assessments. *GCB Bioenergy*. 13. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12798>

Davies-Barnard, T. *et al.* (2015). Quantifying the Relative Importance of Land Cover Change from Climate and Land Use in the Representative Concentration Pathways: Land Cover Change: Climate Versus Land Use. *Global Biogeochemical Cycles*, 29 (6), pp. 842-853.



Deprez *et al.* (2019). Towards a climate change ambition that (better) integrates biodiversity and land use. IDDRI, 2019. Disponible en: https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Etude/201911-ST0819-climate%20biodiv%20land_0.pdf

Devi, P. (2022). Agrochemicals, Environment, and Human Health (October 2022). *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 47, pp. 399-421, 2022. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-120920-111015>

Dooley K., *et al.* (2022a). The Land Gap Report 2022. Disponible en: <https://www.landgap.org/>

Dooley *et al.* (2022b). Carbon removals from nature restoration are no substitute for steep emission reductions, *One Earth* (2022). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.06.002>

Dooley, K. y Kartha, S. (2018). Land-based negative emissions: Risks for climate mitigation and impacts on sustainable development. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*. <https://doi.org/10.1007/s10784-017-9382-9>

Ervine, K. (2013). Carbon Markets, Debt and Uneven Development *Third World Quarterly*, vol. 34, no. 4, 2013, pp. 653-70. JSTOR. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/42002148>

FAO (2020). Forestry Production and Trade database. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>

Fairhead, J. *et al.* (2012). Green Grabbing: a new appropriation of nature? *J. Peasant Stud.* 39, 237-261. <https://doi.org/10.1080/03066150.2012.671770>

Forest Trends' Ecosystem Marketplace (2022). The Art of Integrity: State of the Voluntary Carbon Markets, Q3 Insights Briefing. Washington DC: Forest Trends Association. Disponible en: <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-markets-2022/>

Global Carbon Budget (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14, 4811-4900, 2022. <https://essd.copernicus.org/articles/14/4811/2022/>

Gold Standard (2022). Claims Guidelines. Ginebra, Suiza. Disponible en: <https://globalgoals.goldstandard.org/105-par-claims-guidelines/>

Gonda, C. (2022). Mercados de carbono. Explicaciones y términos básicos para desterrar confusiones. Glosario. Fundación Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: https://farn.org.ar/wp-content/uploads/2022/07/DOC_GLOSARIO-Mercados-Carbono-1.pdf

Günther, P. y Ekardt, F. (2022). Human Rights and Large-Scale Carbon Dioxide Removal: Potential Limits to BECCS and DACCS Deployment. *Land* 2022, 11, 2153. <https://doi.org/10.3390/land11122153>

Hanssen, S. V. *et al.* (2022). Global implications of crop-based bioenergy with carbon capture and storage for terrestrial vertebrate biodiversity. *GCB Bioenergy*, 14, 307-321. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12911>

Heck, V. *et al.* (2018). Biomass-based negative emissions difficult to reconcile with planetary boundaries. *Nature Climate Change*, 8(2). 151-155.



Hof, C. *et al.* (2018). Bioenergy cropland expansion may offset positive effects of climate change mitigation for global vertebrate diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(52), 13294–13299. <https://doi.org/10.1073/pnas.1807745115>

IPBES (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Diaz, S., Settele, E., Brondizio, E. S. *et al.* (eds.), IPBES secretariat, Bonn.

IPCC (2018). Rogelj, J.; D. Shindell; K. Jiang; S. Ffita; P. Forster; V. Ginzburg; C. Handa; H. Kheshgi; S. Kobayashi; E. Kriegler; L. Mundaca; R. Séférian y M. V. Vilariño, 2018: Mitigation Pathways Compatible with 1.5 °C in the Context of Sustainable Development. En: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V. *et al.* (eds.)]. En prensa.

IPCC (2019). Climate Change and Land An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers. IPCC, 423–449. <https://doi.org/10.4337/9781784710644>

IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, 2021.

IPCC (2022). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Shukla, P. R. *et al.* (eds.)] Cambridge University Press, 2022.

Jobbagy, E. *et al.* (2005). Climate and Land–Use Controls on Ecosystem Functioning: Challenges and Insights from the South. En: *Annual Report 2003–2004*. InterAmerican Institute for Global Change (IAI), San Jose dos Campos, Brasil, 47–61.

Keith, H., Vardon, M., Obst, C., *et al.* (2021). Evaluating nature-based solutions for climate mitigation and conservation requires comprehensive carbon accounting. *Science of the Total Environment*, 769(7).

Lewis, S. *et al.* (2019). Regenerate natural forests to store carbon. *Nature*, 568, 25–28.

Mackey, B. *et al.* (2013). Untangling the confusion around land carbon science and climate change mitigation policy. *Nature Climate Change*, 3(6), 552–557.

Mackey, B. *et al.* (2020). Understanding the importance of primary tropical forest protection as a mitigation strategy. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1–25.

MAyDS (2021a). Actualización de la meta de emisiones netas de Argentina al 2030. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2020/12/actualizacion_meta_de_emisiones_2030.pdf

MAyDS (2021b). Cuarto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/cuarto-informe-bienal>



MAyDS (2022). Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/pnaymcc_-_version_integral_con_medidas_-_28.11.2022.pdf

McLaren, D. *et al.* (2019). Beyond "Net-Zero": a case for separate targets for emissions reduction and negative emissions. *Front. Clim.* 1:4. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00004>

Pörtner H. O. *et al.* (2021). IPBES/IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change. IPBES and IPCC.

Samaniego J. L. *et al.* (2021). Impacto de las medidas y/o tecnologías de Remoción de Dióxido de Carbono sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe. Resumen para responsables de políticas, Carnegie Climate Governance Initiative (C2G). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Seddon, N. *et al.* (2019). Grounding Nature-Based Climate Solutions in Sound Biodiversity Science, *Nature Climate Change*, 9 (2), pp. 84-87.

Smith, S. *et al.* (2023). The State of Carbon Dioxide Removal. 1ª edición. Disponible en: <https://static1.squarespace.com/static/633458017a1ae214f3772c76/t/63e3d4602156db24bc18c91c/1675875445298/SoCDR-1st-edition.pdf>

Sweeney, L. B. y Sterman, J. D. (2000). Bathtub dynamics: initial results of a systems thinking inventory. *Syst. Dyn. Rev.*, 16: 249-286. <https://doi.org/10.1002/sdr.198>

United Nations Environment Programme (2022). Emissions Gap Report 2022: The Closing Window - Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies. Disponible en: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/40874>

Upton, S. (2019). Farms Forests and Fossil Fuels: The Next Great Landscape Transformation? Disponible en: <https://www.pce.parliament.nz/media/196523/report-farms-forests-and-fossil-fuels.pdf>

Willett, W.; Rockström, J. *et al.* (2019). Food in the Anthropocene: the EAT- Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447-492.

WWF (2022). Fit for Paris Replacing Kyoto-style CO₂ offsetting: How companies should finance additional climate action. Disponible en: https://www.wwf.ch/sites/default/files/doc-2022-11/20221116_WWF_FFP_B3_Summary%20ENG_final.pdf

Yansen, M. V., & Biganzoli, F. (2022). Las especies arbóreas exóticas en Argentina: caracterización e identificación de las especies actual y potencialmente problemáticas. *Darwiniana, Nueva Serie*, 10(1), 80-97. <https://doi.org/10.14522/darwiniana.2022.101.1001>

Young, A. (1999). Is there really spare land? A critique of estimates of available cultivable land in developing countries. *Environment, Development and Sustainability*, 1(1), 3-18.

Zurita, G. A., *et al.* (2006). Conversion of the Atlantic Forest into native and exotic tree plantations: Effects on bird communities from the local and regional perspectives. *Forest Ecology and Management* 235, 164-173.

