

Dumas, Patrice; Wirsenius, Stefan; Searchinger, Tim; Andrieu, Nadine; Vogt-Schilb, Adrien

Working Paper

Opciones de la agricultura y los cambios del uso del suelo para alcanzar cero emisiones netas en América Latina y el Caribe

IDB Working Paper Series, No. IDB-WP-01377

Provided in Cooperation with:

Inter-American Development Bank (IDB), Washington, DC

Suggested Citation: Dumas, Patrice; Wirsenius, Stefan; Searchinger, Tim; Andrieu, Nadine; Vogt-Schilb, Adrien (2022) : Opciones de la agricultura y los cambios del uso del suelo para alcanzar cero emisiones netas en América Latina y el Caribe, IDB Working Paper Series, No. IDB-WP-01377, Inter-American Development Bank (IDB), Washington, DC, <https://doi.org/10.18235/0004427>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/290018>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>

Opciones de la agricultura y los cambios del uso del suelo para alcanzar cero emisiones netas en América Latina y el Caribe

Patrice Dumas
Stefan Wirsenius
Tim Searchinger
Nadine Andrieu
Adrien Vogt-Schilb

Opciones de la agricultura y los cambios del uso del suelo para alcanzar cero emisiones netas en América Latina y el Caribe

Patrice Dumas
Stefan Wirsenius
Tim Searchinger
Nadine Andrieu
Adrien Vogt-Schilb

Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo

Opciones de la agricultura y los cambios del uso del suelo para alcanzar cero emisiones netas en América Latina y el Caribe / Patrice Dumas, Stefan Wirsenius, Tim Searchinger, Nadine Andrieu, Adrien Vogt-Schilb.

p. cm. — (Documento de trabajo del BID ; 1377)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Climate change mitigation-Latin America. 2. Climate change mitigation-Caribbean Area. 3. Agricultural conservation-Latin America. 4. Agricultural conservation-Caribbean Area. 5. Greenhouse gas mitigation-Latin America. 6. Greenhouse gas mitigation-Caribbean Area. I. Dumas, Patrice. II. Wirsenius, Stefan. III. Searchinger, Tim. IV. Andrieu, Nadine. V. Vogt-Schilb, Adrien. VI. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. VII. Serie.

IDB-WP-1377

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2022 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Después de un proceso de revisión por pares, y con el consentimiento previo y por escrito del BID, una versión revisada de esta obra podrá reproducirse en cualquier revista académica, incluyendo aquellas referenciadas por la Asociación Americana de Economía a través de EconLit, siempre y cuando se otorgue el reconocimiento respectivo al BID, y el autor o autores no obtengan ingresos de la publicación. Por lo tanto, la restricción a obtener ingresos de dicha publicación sólo se extenderá al autor o autores de la publicación. Con respecto a dicha restricción, en caso de cualquier inconsistencia entre la licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas y estas declaraciones, prevalecerán estas últimas.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Opciones de la agricultura y los cambios del uso del suelo para alcanzar cero emisiones netas en América Latina y el Caribe

Patrice Dumas, Stefan Wirseniuss, Tim Searchinger, Nadine Andrieu, Adrien Vogt-Schilb¹

Resumen

Once países en América Latina y el Caribe se han comprometido a alcanzar cero emisiones netas hacia el 2050. Los cambios en el sistema alimentario son fundamentales para alcanzar dichos objetivos de neutralidad de carbono, ya que la agricultura y los cambios del uso del suelo resultantes son responsables de casi la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero en la región.

Cuantificamos los efectos de las opciones del lado de la oferta (p. ej., mejoras en el rendimiento, silvopastoreo, agroforestería) y del lado de la demanda (p. ej., reducción de residuos y pérdidas, cambio de dietas) buscando reducir las emisiones y transformar el sistema del uso del suelo en un sumidero neto de carbono para 2050 y mejorar a la vez la nutrición de una población en crecimiento.

Consideramos tanto las emisiones directas de la agricultura como la presión que ejerce la producción de alimentos sobre los cambios del uso del suelo e hicimos un seguimiento por separado de las emisiones que se producen en la región y aquellas vinculadas al comercio. Nuestros resultados confirman que el ganado desempeña un papel preponderante, ya que emite cerca del 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la agricultura y de los cambios del uso del suelo. Alcanzar un sistema alimentario de emisiones netas negativas, capaz de equilibrar las emisiones del resto de la economía, requerirá mejoras ambiciosas y constantes en los rendimientos y cambios en las dietas para moderar la creciente demanda de carne de res, disminuir continuamente la proporción de suelos dedicados a la agricultura y aumentar, en cambio, aquellos dedicados a la captura de carbono y a la preservación de la biodiversidad.

Palabras clave: Agricultura, silvicultura y otros usos del suelo; AFOLU; alimento; rendimientos; dietas; descarbonización; neutralidad del carbono.

Códigos JEL: Q54, Q15, Q17; Q18

Introducción

La estabilización del cambio climático en 1,5 °C requiere alcanzar cero emisiones netas de CO₂ y reducir drásticamente otros gases de efecto invernadero (GEI) para 2050 (IPCC, 2018). Muchos gobiernos y jefes de Estado han declarado como uno de sus objetivos lograr la neutralidad de carbono

¹ PD: CIRAD. SF: Chalmers University of Technology. NA: CIRAD. AVS: Banco Interamericano de Desarrollo; autor correspondiente (avogtschilb@iadb.org)

para 2050 (CAT, 2021, NTZ 2022), un objetivo que se considera coherente con la creación de oportunidades socioeconómicas (World Bank, 2012, IMF, 2020).

La agricultura, el uso del suelo y los cambios del uso del suelo causan el 21% de las emisiones mundiales de GEI (Lamb et al 2021), principalmente en forma de (1) dióxido de carbono, procedente de la deforestación y de otros cambios del uso del suelo; (2) metano, procedente de los rumiantes (sobre todo del ganado destinado a la producción de carne y lácteos) y de la producción de arroz; y (3) de las emisiones de óxido nítrico procedentes de los fertilizantes. La propia deforestación es impulsada por el consumo de carne, ya que el 77% de las tierras agrícolas del mundo se utilizan para el ganado, ya sea para el pastoreo o para la producción de piensos (FAOSTAT, 2022). Se espera que la demanda de alimentos aumente en más de un 50% para 2050, impulsada por el crecimiento demográfico y de los ingresos, lo que, en caso de no tomarse medidas, provocará un aumento de las emisiones (Searchinger et al, 2019; Tilman and Clark 2014).

Por lo tanto, el uso del suelo y las opciones de dietas deberían desempeñar un papel fundamental en las estrategias de reducción de emisiones (Searchinger et al, 2019, Svensson et al, 2021). El sistema de suelos es único, en el sentido de que podría convertirse en un sumidero neto de carbono mediante la forestación. De hecho, la mayoría de los escenarios revisados por el IPCC utilizan la reforestación para equilibrar las emisiones procedentes de fuentes consideradas difíciles de reducir (p. ej., el transporte aéreo) y, de esta manera, lograr cero emisiones netas en 2050 y emisiones netas negativas en adelante. (IPCC, 2018). Además, los suelos no utilizados para la producción de alimentos pueden utilizarse para conservar la biodiversidad.

América Latina y el Caribe ilustran los desafíos relacionados con el uso del suelo. En la región, el sistema alimentario y de suelos es responsable de algo menos de la mitad de las emisiones de GEI (WRI, 2022) y emplea al 15% de la mano de obra (Saget et al., 2020). Además, la región sufre una aguda crisis de biodiversidad, ya que en 50 años ha perdido el 94% de su población de vertebrados, en gran parte debido a la destrucción de hábitats (WWF, 2020). Al mismo tiempo, 11 países de la región ya se han comprometido a alcanzar cero emisiones netas hacia el 2050 (NTZ 2022), un objetivo que podría crear el equivalente al 1% del PIB en beneficios económicos y generar 15 millones de nuevos empleos netos para 2030 en la región (Saget et al., 2020; Vogt-Schilb, 2021).

Muchas opciones podrían reducir las emisiones de GEI de la agricultura (Searchinger et al 2019; Fazekas et al, 2022). Por ejemplo, cambios en la dieta animal, una cría de animales dirigida a una menor producción de metano y una reducción de las emisiones de metano entérico mediante agentes antimicrobianos pueden reducir las emisiones del ganado, al igual que puede hacerlo el control del tiempo de inundación en los arrozales. La mejora de la eficiencia de la fertilización nitrogenada o el uso de más cultivos de leguminosas, que fijan el nitrógeno, pueden reducir las emisiones de N₂O. La protección de los bosques; el silvopastoreo y la agroforestería (en donde se cultivan árboles en el mismo suelo que se utiliza para el ganado o los cultivos); el aumento de los rendimientos y la reducción del consumo de productos que exigen un uso más intensivo de suelos (incluida la carne de res), pueden ayudar a reducir la deforestación y aumentar, en cambio, la cobertura boscosa.

La evaluación de las opciones de reducción de emisiones enfrenta varios desafíos. Uno de ellos se refiere a las emisiones derivadas de los cambios del uso del suelo. La mayoría de los análisis del ciclo de vida atribuyen las emisiones derivadas de la deforestación al uso del suelo que se produce en parcelas que han sido despejadas recientemente, por ejemplo, para dar cabida al pastoreo o al cultivo de palma aceitera (p. ej., Henders et al 2015). En cambio, estudios recientes han destacado la importancia de considerar el *costo de oportunidad de carbono del suelo*, vinculado a la noción de que el uso del suelo para la agricultura sacrifica intrínsecamente el potencial de almacenar más carbono usando vegetación nativa (Searchinger et al, 2018).² El comercio representa el segundo desafío, ya que una fracción de los GEI generados por el sistema alimentario está "incorporada" en las exportaciones a otros países (p. ej, Pendrill et al, 2019; Hong et al, 2020). Entre una quinta y una cuarta parte de las emisiones de GEI del sistema alimentario de América Latina y el Caribe están relacionadas con las exportaciones al resto del mundo (Saget et al, 2020, Dummet et al, 2020).

Hasta donde sabemos, no existe ningún estudio de opciones para alcanzar sistemas alimentarios con emisiones netas cero o inclusive negativas para América Latina y el Caribe que considere los dos desafíos descritos anteriormente. Los modelos de evaluación integrada, a escala mundial, que proporcionan resultados para la región (p. ej., Calvin et al. 2016, Santos Da Silva 2019) tienden a centrarse en el papel de la forestación y la bioenergía, a agrupar las opciones del lado de la oferta y rara vez informan sobre el impacto del comercio y los cambios en la dieta. Los estudios de reducción de emisiones que se centran en la región a veces incluyen cambios en la dieta (p. ej., Bataille et al. 2020; Groves et al, 2020; Quiros-Tortos et al, 2021; Benavides et al, 2021, Schaldach et al. 2017), pero tienden a descuidar las opciones agrícolas para reducir las emisiones directas, así como a ignorar el impacto del comercio.

En este estudio se cuantifican las opciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de alimentos en América Latina y el Caribe, considerando sus impactos a través de las emisiones directas de la producción, el costo de oportunidad de carbono del suelo y el comercio mundial. Se estudian escenarios contrastados hasta el año 2050 que exploran tanto los cambios en la oferta como en la demanda. Estos incluyen una línea de base basada en las tendencias históricas y tres escenarios de reducción de emisiones con distintos niveles de ambición, que se calibran a partir de publicaciones que cuantifican las opciones de reducción de emisiones para la región. Aunque el estudio abarca todos los productos, la carne de res (o vacuno) es objeto de especial atención, debido a su importancia en la dieta regional y como impulsor de emisiones. Nuestros escenarios pretenden explorar opciones y estimular debates. No deben interpretarse como material normativo, ya que utilizan datos imperfectos, y no tienen en consideración ningún obstáculo para su implementación.

Utilizamos un modelo que se centra en América Latina y el Caribe a la vez que describe el sistema global de agricultura y uso del suelo, basado en Searchinger et al (2019). Proporcionamos resultados

² Ambos métodos concluyen que el ganado es la principal causa de deforestación a nivel mundial. Pero existen algunas diferencias. Por ejemplo, en el enfoque de parcelas recientemente desbrozadas, el aceite de palma y la soja se identifican como impulsores importantes, mientras que en el enfoque de costo de oportunidad del carbono se considera que estos tienen un impacto similar al de otros aceites y otros cereales respectivamente (Searchinger et al, 2018).

para la región en su conjunto, y, en un anexo, para sus dos países más grandes, Brasil y México, y para 4 subregiones, los Andes, el Caribe, América Central y el Cono Sur. Evaluamos tanto las emisiones directas de la producción agrícola como el costo de oportunidad de carbono del suelo utilizado para la alimentación, obtenido mediante la intersección de un mapa de cultivos y pasturas y un mapa del contenido de carbono en la vegetación natural que podría crecer en el mismo suelo (Searchinger, 2018).

Nuestros resultados confirman que la carne de res desempeña un papel desproporcionado en las emisiones de GEI de la agricultura en América Latina. La producción de carne de res es responsable del 57% de las emisiones de la producción agrícola y del 58% de las emisiones del uso del suelo, mientras que solo aporta el 12% de las proteínas (9 g por persona al día) y el 4% de la ingesta de calorías (105 kcal por persona al día) en la región.

Los modelos de desarrollo actuales tienen un impacto medioambiental insostenible. En nuestro escenario de línea de base, el crecimiento económico significa que la ingesta calórica promedio pasaría de 2.710 kcal/día a 2.954 kcal/día per cápita hacia el 2050, mientras que el consumo de carne de res aumenta a 11 g/día. Junto con el crecimiento demográfico, esto llevaría a que las emisiones de la agricultura crecieran casi un 45%, pasando de 850 a 1.220 MtCO₂e al año y a que las emisiones del cambio del uso del suelo alcanzaran los 1.340 MtCO₂eq/año en promedio. Estos cambios se producen a pesar del aumento de la eficiencia del ganado, del aumento de un 44% del rendimiento de los cultivos y de un 30% en el de las pasturas.

La reducción del impacto de la carne de res es esencial para transformar a América Latina y el Caribe en un sumidero neto de carbono. En nuestro escenario más ambicioso del lado de la oferta, las emisiones directas se reducen en un 10% en comparación con el año de referencia, 2010, pero los cambios del uso del suelo se revierten, absorbiendo 1,330 MtCO₂eq/año en promedio. Esto requiere acciones transformadoras: las tasas de carga ganadera para la carne de res (una medida del número de vacas que pastan en una hectárea de tierra) aumentan un 75%, la eficiencia en el uso del nitrógeno (una medida de la cantidad de fertilizantes que se necesitan para lograr un rendimiento determinado) aumenta un 35%, y el rendimiento de los cultivos aumenta un 72%. Las tres cuartas partes de las absorciones del cambio del uso del suelo proceden de nuestra suposición de que el silvopastoreo y otras ganancias en eficiencia pueden mejorar drásticamente el rendimiento de las pasturas.³

Las soluciones del lado de la demanda también pueden hacer que el sector agrícola y el uso del suelo sean un sumidero neto de carbono. En nuestro escenario más ambicioso del lado de la demanda, el consumo de carne de res aumenta en los países más pobres de la región, especialmente en América Central y el Caribe, pero se reduce entre un 62% y un 85% en comparación con los niveles históricos de los mayores consumidores en el Cono Sur, y alrededor de un 45% en los países andinos de alto consumo de carne de res. El promedio regional disminuye un 50%, mientras que los resultados

³ Hay que tener en cuenta que nuestras simulaciones del lado de la oferta suponen una demanda exógena. En realidad, aumentar los rendimientos sin proteger los bosques o moderar la demanda de productos que exigen un uso intensivo de suelos, como la carne de res, probablemente daría lugar a una mayor deforestación, ya que aumentaría el incentivo de los agricultores y ganaderos para ampliar su negocio.

nutricionales mejoran en todos los países, las emisiones directas se estabilizan y los cambios del uso del suelo se revierten para absorber el equivalente a 1,740MtCO₂eq/año.

La combinación de las opciones de oferta y demanda reduce las emisiones directas en un 40% respecto al año de referencia, hasta 500 MtCO₂/año, mientras que los cambios del uso del suelo absorben 3.250 MtCO₂eq/año. Esto es coherente con la posibilidad de alcanzar economías con cero emisiones netas para 2050 si se reducen drásticamente las emisiones de la energía, la industria y los desperdicios, que no se modelan aquí.⁴ Sin embargo, una advertencia importante es que para continuar con las emisiones negativas después de 2050 sería necesario seguir reduciendo el impacto en el suelo de la producción de alimentos para poder seguir dedicando más suelos a la restauración de ecosistemas con altas reservas de carbono, una tarea de por sí bastante difícil.

En lo que respecta al comercio mundial, encontramos que las exportaciones de alimentos de América Latina y el Caribe tienden a empeorar las emisiones mundiales. La producción de la región es tan intensiva en gases de efecto invernadero como la del resto del mundo si se consideran solo las emisiones directas, pero tiende a generar más emisiones por los cambios del uso del suelo. De hecho, los ecosistemas con altas reservas de carbono de la región hacen que el costo de oportunidad de carbono de sus suelos sea ligeramente superior a la media mundial.

Nuestro análisis tiene muchas limitaciones. No cuantificamos las opciones para ampliar las nuevas tecnologías, como los alimentos basados en células, y nos vimos limitados por los datos regionales disponibles. No investigamos las limitaciones, como la falta de capacidad, las trabas de financiamiento, las señales de precios contraproducentes, las barreras culturales y las cuestiones de economía política que podrían obstaculizar las transformaciones que consideramos (p. ej., Fazekas et al, 2022). Otras investigaciones podrían centrarse en países concretos, aprovechar al máximo las entrevistas con expertos de los países y utilizar datos más precisos. A pesar de estas limitaciones, nuestro documento muestra que alcanzar emisiones netas negativas en el sistema agrícola y de uso del suelo en América Latina y el Caribe requerirá cambios muy drásticos tanto en la oferta como en la demanda de alimentos, y que la intensificación de las pasturas y los cambios en la dieta para reducir la demanda de carne de res son las opciones más prometedoras para reducir las emisiones de GEI.

En cuanto a la tarea más general de planificar una economía con cero emisiones de gases de efecto invernadero, nuestro documento atenúa las afirmaciones de que América Latina y el Caribe puede actuar como sumidero natural de carbono a nivel mundial y compensar las emisiones del resto del mundo. Los gobiernos se enfrentan a duras disyuntivas a la hora de arbitrar la asignación de suelos entre la producción de alimentos (y el ganado en particular) frente a la captura de carbono y la preservación de la biodiversidad. Nos unimos a muchas voces recientes que advierten que cualquier estrategia para alcanzar las cero emisiones netas, a nivel de país o de empresa, debería primero reducir drásticamente las emisiones de los combustibles fósiles y los procesos industriales y solo considerar las compensaciones mediante la reforestación como último recurso (p. ej., Fankhauser et al, 2020).

⁴ Como referencia, las emisiones de la región en 2018 se acercaban a 4 GtCO₂eq y podrían duplicarse para 2050 si no se toman las medidas necesarias.

El resto del documento está estructurado de la siguiente manera: En la siguiente sección se describe el modelo que utilizamos. A continuación, se examinan las publicaciones en busca de opciones para reducir las emisiones de la producción de alimentos en América Latina y el Caribe. En la próxima sección se explica cómo configuramos nuestras simulaciones numéricas. A continuación, se presentan los resultados de nuestras simulaciones y, en la última sección, se ofrece una discusión y una conclusión.

Modelo

Utilizamos un modelo de equilibrio global que representa el equilibrio de la oferta y la demanda agrícola en un año (Searchinger et al. 2019, Mora et al. 2020). Lo ejecutamos para el año de referencia, 2010 (calibrado con datos de FAOSTAT), y para el año 2050. El modelo calcula los usos del suelo, los cambios del uso del suelo y las emisiones de GEI resultantes de la demanda interna y las exportaciones netas, tomando como base los rendimientos, las dietas, los piensos necesarios para producir ganado y las normas relativas al comercio. Representamos explícitamente seis países o subregiones de América Latina y el Caribe: Brasil, México, los Andes (que incluye a Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela), y el Caribe, América Central (que también incluye a las Guayanas), y el Cono Sur (que incluye a Chile, Argentina, Uruguay, Paraguay). En el texto, solemos referirnos a estas como las “subregiones”, y tendemos a reservar el término “la región” para referirnos a “América Latina y el Caribe”.

La demanda interna es exógena. Proviene del consumo directo de alimentos, del uso de piensos (impulsado por la demanda del ganado), del uso de procesamiento, por ejemplo, para producir aceite, cultivos oleaginosos y harinas oleaginosas⁵, y de la demanda no alimentaria. El consumo de alimentos se basa en las dietas per cápita (elegidas exógenamente en cada escenario) multiplicadas por la población (a partir de las proyecciones de la ONU). La demanda no alimentaria (p. ej., textiles, materiales, biocombustibles) es exógena y constante en todos los escenarios (como en Searchinger et al, 2019). Las necesidades de insumos y las relaciones de coproducción son todas lineales. Las pérdidas también se representan con relaciones lineales. Utilizamos diferentes coeficientes para captar las pérdidas del lado de la oferta y las pérdidas y desperdicios del lado de la demanda. También tenemos en cuenta las pérdidas específicas de alimentos con coeficientes que relacionan la energía alimentaria disponible y la energía alimentaria consumida (calibradas usando datos de Gustavsson et al. 2011).

El comercio bilateral no está representado. En cambio, todas las subregiones importan y exportan a una reserva mundial para cada producto. El comercio se representa de forma diferente para la carne de res, los productos lácteos y los productos derivados de pequeños rumiantes, que están asociados con los pastizales, y para otros productos. En el caso de la carne de res, los productos lácteos y los productos derivados de pequeños rumiantes, los porcentajes de producción se modifican en función del cambio de eficiencia, y una parte de la producción láctea se mantiene a nivel local. El método se explica con más detalle con el cambio de eficiencia más adelante. En el caso de otros productos, las importaciones se

⁵ Las *harinas oleaginosas*, también conocidas como *harinas de semillas oleaginosas*, son la sustancia rica en proteínas que queda después de extraer el aceite de las plantas oleaginosas. Se utilizan como pienso o fertilizante.

determinan como una parte de la demanda nacional, basándose en una tasa de dependencia fija calibrada con datos de 2010 de FAOSTAT. Esto da como resultado una cuantificación total del comercio mundial para cada producto. A partir de ahí, las exportaciones se determinan bajo la suposición de que la cuota de mercado de cada país o grupos de países se mantiene constante a sus cifras en el año de referencia según FAOSTAT, salvo en los escenarios que especifican una regla diferente.

La producción porcina, avícola y de la mayoría de los cultivos simplemente se ajusta a la demanda. También utilizamos las siguientes reglas específicas para cada ítem. La producción de carne de res se calcula a partir de la demanda de productos lácteos y de carne de res. La demanda de productos lácteos determina la producción conjunta de carne de res y lácteos calibrada a partir de Herrero et al. (2013), y así la producción de carne de res se ajusta para satisfacer la demanda total de carne de res. Los aceites vegetales se consideran sustitutos perfectos. La producción de cultivos oleaginosos está impulsada por la demanda de harinas oleaginosas, salvo en el caso del aceite de palma. La demanda de aceite de palma se ajusta para satisfacer la demanda total de aceite vegetal. Adoptamos tendencias exógenas de la pesca (extractiva), que asignamos para satisfacer las necesidades de alimentos y piensos. Si la demanda de alimento es superior a la que puede satisfacer la pesca extractiva, asumimos que la demanda residual se satisface con la acuicultura (usando especies de pescado grasos). Se supone que la acuicultura suple la demanda de alimentos que la pesca extractiva no puede satisfacer. Información de acuicultura procedente de Hall et al., 2011 y Munkung et al., 2014.

Los aportes de nitrógeno se basan en la producción por cultivo y en la eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) de cada cultivo, calibrados a nivel de país o de grupo de países a partir de Zhang et al (2015). El nitrógeno sintético se calcula a partir de la diferencia entre el aporte total de nitrógeno y las demás fuentes de nitrógeno: estiércol (ganado y coeficientes determinados a partir de Herrero et al. 2013), fijación biológica (determinada mediante los coeficientes de fijación) y deposición procedentes de Zhang et al. (2015).

Las emisiones directas de la producción se toman de Herrero et al. (2013), con base en el método del IPCC para las emisiones de óxido nitroso y en los datos de FAOSTAT de las emisiones directas de la producción del consumo energético en la agricultura, salvo en el caso de la acuicultura, que proceden de Hall et al., 2011 y Munkung et al., 2014. Las emisiones de metano del arroz son calculadas por Yan et al. 2009. Las emisiones de la producción de insumos, correspondientes a la obtención o síntesis de fertilizantes y a la síntesis de plaguicidas, proceden de la EPA (2010). Las opciones de reducción de emisiones se modelan como coeficientes de reducción, salvo en el caso del arroz, para el que se utilizan los resultados de un modelo de hoja de cálculo (Yan et al. 2009). En el caso de la acuicultura, también se puede utilizar el cambio de sistemas de producción.

El costo de oportunidad de carbono del suelo cuantifica la cantidad de carbono que podría capturarse si el suelo utilizado para la producción de alimentos se usara en cambio en el cultivo de vegetación nativa (Searchinger, 2018). Lo evaluamos entrecruzando un mapa de ubicación de cultivos y pasturas con uno de contenido de carbono de la vegetación natural. El mapa del contenido de carbono en la vegetación

natural se basa en el contenido potencial de carbono calculado por un modelo de vegetación reajustado según los promedios por bioma encontrados en las publicaciones. El contenido de carbono en los cultivos se sustrae para los cultivos perennes.

El costo de oportunidad del carbono corresponde a la reserva total de contenido de carbono que se acumularía, en décadas, si se abandonara la agricultura. A fin de calcular un flujo de emisiones equivalente, lo anualizamos utilizando una tasa de descuento del 4% anual, lo que corresponde a una división del carbono potencial por aproximadamente 30 años. Este cálculo se utiliza para el año de referencia. Para los escenarios hasta 2050, el uso del suelo se determina utilizando rendimientos del uso del suelo basados en rendimientos agrícolas exógenos por producto y un coeficiente de intensidad de cultivo exógeno por país (o grupo de países). Luego, se utilizan los patrones de cambio del uso del suelo de 2007-2011 para determinar la vegetación sustituida por cada cultivo y por las pasturas, y se utiliza el contenido medio de carbono por bioma y tipo de vegetación para determinar el contenido de carbono de la vegetación natural, utilizando el mismo factor para calcular el equivalente anual y para el año de referencia.

Con este método, se pueden comparar las variaciones de las reservas de carbono asociadas con las emisiones del cambio del uso del suelo, que se producen una vez, y agregarse a las emisiones de la sustitución de combustibles fósiles por biomasa y las emisiones de producción que se repiten. El balance general depende fundamentalmente de la tasa de descuento considerada o, lo que es lo mismo, del factor de amortización.

Revisión de las opciones para reducir las emisiones en América Latina y el Caribe

Esta sección revisa las opciones para reducir las emisiones del sistema alimentario. La siguiente sección proporciona detalles sobre cómo modelamos estas opciones en nuestras simulaciones.

Opciones del lado de la oferta

Usamos el conocimiento de expertos y las publicaciones para determinar una lista de opciones interesantes para reducir los GEI de la agricultura y sus magnitudes y para evaluar la relevancia para América Latina y el Caribe de las opciones enumeradas por Searchinger et al (2019). La principal fuente bibliográfica son los estudios de análisis del ciclo de vida (ACV) que comparan las prácticas agrícolas y las cadenas de valor, así como los estudios a mayor escala sobre el potencial de las opciones de reducción de GEI del sector agrícola. Revisamos todos los estudios basados en América Latina y el Caribe analizados en el riguroso estudio de Poore et al. (2018). Algunas de las prácticas enumeradas a continuación, como las relacionadas con el aumento del carbono en suelo o el fomento del sistema silvopastoril, se describen a veces bajo el término general de "agricultura regenerativa".

La producción ganadera puede intensificarse proporcionando más alimento digerible al ganado, ya sea pasto más digerible o alimento concentrado; aumentando el número de cabezas de ganado o rotando el ganado en las pasturas para que coincida con el crecimiento del pasto; añadiendo leguminosas fijadoras

de nitrógeno en sus pasturas; eliminando las plantas que el ganado no puede comer; evitando la degradación de las pasturas y complementando la ingesta de pasto en la estación seca, con heno o alimento concentrado. Las comparaciones de los niveles de intensificación del sector ganadero en toda América Latina y el Caribe concluyen sistemáticamente que una cría de ganado más intensiva conlleva menos emisiones de producción por unidad de producto y menos uso del suelo (Bartl et al. 2011, Celis et al. 2013, Picasso et al. 2014, Dick et al. 2015, Mazzetto et al. 2015, Cardoso et al., 2016, Huerta et al. 2016, Pashaei Kamali et al. 2016). El silvopastoreo es una práctica en la que los arbustos y árboles que fijan el nitrógeno complementan el pasto para evitar el agotamiento de los nutrientes y proporcionan un microclima más favorable. El silvopastoreo puede reducir significativamente el costo de oportunidad del carbono del ganado, a través del aumento de la producción por unidad de pienso y por unidad de superficie de pasturas; la disminución del uso de insumos y la acumulación de carbono en los árboles (Landholm et al. 2019, Arango et al. 2020). La intensificación mediante el uso de más piensos concentrados y corrales de engorde reduce los GEI y a menudo aumenta los impactos ambientales aparte de las emisiones de GEI, en particular la toxicidad (Picasso et al. 2014, Dick et al. Huerta et al. 2016), y en algunos casos la contaminación por nutrientes (Picasso et al. 2014).

Ningún análisis del ciclo de vida sobre la mejora de la producción ganadera, que hayamos revisado, tiene en cuenta las emisiones derivadas del cambio del uso del suelo. En Searchinger et al. (2018), las estimaciones del impacto de las opciones de intensificación de la producción de carne de res en las emisiones de GEI procedentes de Cardoso et al. (2016) se completan con las estimaciones de las emisiones del cambio del uso del suelo Searchinger et al encuentran que, aunque los sistemas basados en la intensificación de pasturas y en la alimentación con concentrados se asocian con emisiones de producción similares, las emisiones relacionadas con el uso del suelo son mayores con la intensificación de pasturas, lo que hace que la alimentación con concentrados sea una mejor opción para reducir las emisiones totales de GEI. Las reducciones de emisiones asociadas con la eliminación del ganado o con la intensificación ganadera dependen del costo de oportunidad de carbono del suelo local y de las emisiones de la fauna natural. Las reducciones de emisiones pueden ser especialmente altas en las regiones ecuatoriales, donde el ganado sustituye a los bosques densos, pero también pueden ser bajas o nulas en las regiones donde los pastizales son la vegetación natural y los rumiantes salvajes sustituirían al ganado y emitirían cantidades de metano similares a las del ganado.

Los estudios a mayor escala sobre la intensificación ganadera han evaluado las consecuencias de la restauración de las pasturas (Strassburg et al. 2014, De Olivera Silva et al. 2018), o tanto de la restauración de las pasturas como de más piensos concentrados, considerándose que los piensos concentrados son más eficientes (Batista et al. 2019). Los estudios a gran escala consideran las emisiones del cambio del uso del suelo de diferentes maneras, aunque no siempre tratan de aprovechar las posibilidades de la reforestación.

También se proponen cambios en el manejo del estiércol, concretamente evitar su eliminación en sistemas húmedos (las lagunas en particular) para reducir las emisiones relacionadas con el ganado en América Latina y el Caribe (Celis et al. 2013, Cherubini et al. 2015).

La eficiencia en el uso del nitrógeno es otra opción. Se describe el uso de leguminosas como cultivos de cobertura para la caña de azúcar (de Oliveira-Bardonal et al. 2012) y los arándanos (Cordes et al. 2016). Algunos estudios también encuentran cifras diferentes en la eficiencia en el uso de insumos, mostrando el potencial de aumento de la eficiencia en el uso del nitrógeno para las frutas y los frutos secos (Ingwersen 2012, Brito de Figueiredo et al. 2016, Cordes et al. 2016). La reducción de los fertilizantes sintéticos y minerales puede ayudar a reducir las emisiones de óxido nitroso, pero hay que tener cuidado para evitar la disminución de los rendimientos, lo que podría conducir a la sustitución de la vegetación natural y a importantes emisiones derivadas del cambio del uso del suelo. Un estudio demostró que el cultivo de naranjas orgánicas en pequeñas explotaciones de Brasil (de menos de 75 hectáreas) podría alcanzar casi el mismo rendimiento que el cultivo convencional con menos fertilizantes sintéticos y minerales, más biodiversidad y cobertura vegetal (Knudsen et al. 2011). No obstante, en otros casos, los rendimientos de los cultivos orgánicos suelen ser menores o mucho menores, lo que supone un aumento de las emisiones derivadas del cambio del uso del suelo. Aumentar los rendimientos sin incrementar demasiado el uso de insumos también es una forma de disminuir las emisiones del cambio del uso del suelo. En Chile se determinó un cierto potencial para aumentar los rendimientos en el caso de la papa (Haverkort et al. 2014).

Otra opción que se propone en las publicaciones para reducir las emisiones del uso del suelo es aumentar el carbono del suelo. Algunas publicaciones sobre América Latina y el Caribe sugieren que la agricultura de labranza reducida o nula podría aumentar el carbono orgánico del suelo (Castanheira et al. 2013, Maia et al. 2013), salvo en el bioma amazónico. No obstante, aquellos estudios que encuentran un aumento del carbono orgánico del suelo con la transición a la agricultura de labranza reducida o nula solo consideran el cambio de carbono de la capa superficial de la tierra (0-30 cm). Al considerar una mayor profundidad del suelo o todo el suelo, la mayoría de las estimaciones de los efectos de la labranza reducida se empequeñecen y dejan de ser significativas (Luo et al. 2010, Dendooven et al. 2013, Mondal et al. 2010). Existe evidencia de que la retención de residuos (Dendooven et al. 2013, Raffa et al. 2015) permite mantener el carbono orgánico en los suelos, pero también existe evidencia de que en algunos lugares de América Latina y el Caribe ya se están utilizando residuos para la ganadería (Beuchelt et al. 2015). Evitar la quema de residuos permite añadir o mantener el carbono orgánico del suelo, en particular, para la caña de azúcar (Galdos et al. 2010, de Oliveira-Bardonal et al. 2012, Garcia et al. 2016). Los cultivos de cobertura (Poeplau et al. 2015, Bai et al. 2019) se asocian con un aumento más significativo del carbono orgánico del suelo.

El uso directo de energía también podría reducirse en algunos casos (Ingwersen 2012). Por ejemplo, la agricultura de labranza reducida o nula conduce a un menor uso de combustible (Castanheira et al. 2013).

El uso de la bioenergía para sustituir los combustibles fósiles no es una opción tan interesante si se tienen en cuenta las emisiones derivadas del cambio del uso del suelo. Cuando los estudios tienen en cuenta que los cultivos para la producción de combustible desplazan la vegetación natural, concluyen que la bioenergía provoca más emisiones que los combustibles fósiles (de Souza et al. 2010, Lapola et al. 2010, Garcia et al. 2011, Searchinger et al. 2018). El uso de productos desechados como bioenergía

puede conducir a una reducción neta de las emisiones; un ejemplo de un estudio sobre el uso de plátanos desechados de los árboles que dan sombra al café para producir etanol (Graefe et al. 2011).

La agroforestería es una opción interesante para reducir las emisiones de varios cultivos, especialmente las del cacao (Ortiz-Rodriguez et al. 2016, Perez-Neira et al. 2016, Schroth et al. 2016) y el café (Graefe et al. 2011, Noponen et al. 2012, van Rikxoort et al. 2014, Rahn et al. 2014). De hecho, los árboles usados para generar sombra también almacenan carbono. Además, pueden tener un efecto positivo en el rendimiento ganadero, aunque esto depende del número de árboles por hectárea. También pueden proporcionar alimentos o piensos, nitrógeno en caso de que se usen leguminosas, y leña que puede sustituir los combustibles fósiles. En particular, los árboles de sombra con un nivel de densidad intermedio, descritos como sistemas de policultivo comercial almacenan niveles relativamente altos de carbono con rendimientos muy similares a los de los monocultivos. Ningún estudio dispone de información detallada completa del balance de los GEI, incluyendo el almacenamiento de carbono en los árboles, el efecto de los fertilizantes y las emisiones relacionadas con el cambio del uso del suelo, lo que permitiría tener una idea más precisa del balance general.

La reducción de las emisiones del arroz se ha estudiado mucho menos en América Latina y el Caribe que en Asia, pero las opciones son similares, con cambios en la inundación y en el manejo de los residuos (Chirinda et al. 2018). Los cambios en el manejo de residuos se presentan como cambios en la labranza, ya que las reducciones de las emisiones de metano, tras un cambio en la labranza son el resultado de la incorporación de los residuos al suelo. También se presenta un estudio que muestra los efectos de los residuos dejados en la superficie del suelo frente a aquellos incorporados, con una reducción muy importante de las emisiones (Zschornack et al. 2011). Dado que el cambio evaluado en este estudio es el mismo que el efecto de la incorporación de residuos asociado con la reducción de la labranza, y dado que estos resultados no han sido reproducidos, no consideramos que esta opción sea fiable. En la modelación y los escenarios, reutilizamos el mismo enfoque para el efecto de las inundaciones y el manejo de los residuos para América Latina y el Caribe que para el resto del mundo (Chirinda et al. 2018, Yan et al. 2009)⁶.

Opciones del lado de la demanda

El cambio mundial de la dieta humana puede ser una opción importante para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Una opción es sustituir parte de la ingesta de proteínas del ganado por cultivos ricos en proteínas como la soja o los frijoles (Searchinger et al, 2019).

Algunos autores han argumentado que el consumo mundial de carne de res podría reducirse hasta el punto de que la carne de res no se produzca en zonas con un alto costo de oportunidad del carbono, y en su lugar se relegue a zonas de bajo costo de oportunidad como las sabanas (Searchinger et al, 2019). En América Latina y el Caribe, la mayor parte de la carne de res y los productos lácteos proceden de zonas templadas (incluidas las zonas de mesetas elevadas húmedas) o las zonas tropicales húmedas, lo

⁶ Las emisiones reportadas en Chirinda et al. 2018 proceden de FAOSTAT, utilizando un método más sencillo que el de nuestro estudio. Son similares dentro del 30% con los datos utilizados en nuestra modelación, salvo para Brasil con emisiones mucho más bajas en FAOSTAT (0,06 en FAOSTAT versus 0,21 toneladas CH₄/ha en Yan et al. 2009)

que significa que existe un gran potencial de sustitución de la demanda antes de que toda la producción con alta intensidad de carbono se sustituya.

El impacto de la dieta en la salud es otra cuestión importante. Por ejemplo, en América Latina y el Caribe, la prevalencia de la inseguridad alimentaria es muy alta, llegando a superar el 75% (Benites-Zapata et al, 2021). Pero, aunque algunos hogares sufren por la ingesta insuficiente de proteínas, el principal problema de desnutrición en la región es que las dietas tienden a ser deficientes en frutas, verduras, fibra y cereales integrales, y excesivas en carnes procesadas, carnes rojas y bebidas azucaradas (IDB, 2019). El consumo de carne de res también está distribuido de manera muy desigual (gráfico 1 del Apéndice): Brasil y el resto del Cono Sur consumen 13 g y 18 g de proteína de res por día y por persona, respectivamente, en comparación con los 11 g en Canadá y Estados Unidos, una media de 9 g en toda la región, 6 g en Europa, 4 g a nivel mundial y menos de 4 g en el Caribe y América Central. Esto sugiere que puede haber cierto margen para reducir el consumo medio de carne de res al tiempo que se mejoran los resultados nutricionales en todos los países de la región.

Dentro de los productos ganaderos, la carne de cerdo y las aves de corral se asocian con menores emisiones que los rumiantes (carne de res, productos lácteos, ovejas y cabras), de modo que la sustitución de la carne de res por otros productos animales también puede reducir el impacto de los GEI de las dietas. Aunque la producción de carne de res es relativamente barata en América Latina y el Caribe, otras fuentes de proteínas suelen ser más baratas de producir, lo que significa que la reducción del consumo de carne de res podría suponer un ahorro financiero. Puede haber muchos otros obstáculos para el cambio de las dietas humanas que no se consideran en este estudio (p. ej., IDB 2019, Fazekas et al, 2022).

Otra opción para la reducción de la demanda es la reducción de pérdidas y desperdicios, que se estima que afectan al 14% de la producción mundial de alimentos solo entre las etapas de cosecha y venta al por menor (FAO, 2019). A veces se propone como opción la moderación del aumento de la población humana, aunque en América Latina y el Caribe la densidad de población y las tendencias demográficas son menores que en otras regiones del mundo. No modelamos diferentes escenarios poblacionales.

Establecimiento de escenarios de reducción de emisiones

Estudiamos, por un lado, escenarios contrapuestos hasta 2050 que exploran tanto los cambios en la oferta como en la demanda, incluyendo una línea de base basada en las tendencias históricas y, por el otro, tres escenarios de reducción de emisiones de diversa ambición, calibrados a partir de las publicaciones presentadas anteriormente y del juicio de los expertos. Aunque el estudio abarca todos los productos, la carne de res es objeto de especial atención, debido a su importancia en la dieta regional y como impulsor de emisiones. Calibramos nuestros escenarios a partir de la revisión de las publicaciones presentadas más adelante y del juicio de los expertos. Creemos que todos nuestros escenarios son técnicamente viables, pero no exploramos la viabilidad política o financiera. Nuestros escenarios pretenden explorar las opciones para alcanzar los objetivos de estabilización climática a

largo plazo y estimular los debates. No deben interpretarse como material normativo, ya que utilizan datos imperfectos, y no tienen en consideración ningún obstáculo para su implementación.

La configuración general de los escenarios es la siguiente Searchinger et al (2019), con una línea de base basada en el trabajo ampliamente utilizado de la FAO (Alexandratos et al., 2012). Dado que la eficiencia del ganado (p. ej., en cabezas por hectárea) y el cambio de rendimiento de las pasturas no se especifican en el escenario de Alexandratos et al. 2012, hacemos suposiciones adicionales basadas en la continuación de las tendencias.

Consideramos cuatro escenarios de reducción de emisiones por el lado de la oferta, que denominamos “Producción razonable”, “Producción ambiciosa”, “Producción avanzada” y “Mejor rendimiento de las pasturas”. Los tres primeros escenarios incluyen cambios en el rendimiento de los cultivos y la eficiencia del ganado, así como en la eficiencia del uso del nitrógeno y opciones tecnológicas que reduzcan directamente las emisiones de GEI. El escenario de “Mejor rendimiento de las pasturas” simula cambios muy ambiciosos en la tasa de carga ganadera que reflejan el impacto de la intensificación de la producción de carne de res y el uso de sistemas silvopastoriles en América Latina y el Caribe (pero no en el resto del mundo), pero ninguna otra mejora del lado de la oferta en comparación con la línea de base (Strassburg et al. 2014, Landholm et al. 2019).

Los escenarios del lado de la oferta se simulan con una variante relativa al comercio. En la implementación estándar, las exportaciones de cada ítem de cada país o grupo de países se mantienen al ritmo del comercio mundial. En la variante, las exportaciones de América Latina y el Caribe se fijan en las cantidades correspondientes al año de referencia. Las importaciones que no son satisfechas por las exportaciones de América Latina y el Caribe son satisfechas por el resto del mundo, utilizando los porcentajes respectivos en el comercio total reajustados tras eliminar a América Latina y el Caribe. La comparación de estas variantes proporciona información sobre el impacto del comercio en las emisiones globales, y muestra si, desde una perspectiva global de los GEI, resulta más eficiente producir en América Latina y el Caribe o en el resto del mundo.

Por el lado de la demanda, modelamos tres escenarios de dietas globales: un escenario “Moderada de carne de res a otros animales” que evita el aumento del consumo de carne de res en las regiones poco consumidoras de carne de res, y propone cierta disminución en las grandes consumidoras de carne de res, como América Latina y el Caribe, y dos cambios en la dieta más ambiciosos, uno dirigido a los consumidores de carne de res, “Ambiciosa de carne de res a verduras” y otro dirigido a todos los productos animales “Ambiciosa de animales a verduras”. Para cada uno de los escenarios de dieta global, modelamos una variante en la que las dietas cambian solo en América Latina y el Caribe (mientras que el resto del mundo continúa con la dieta de línea de base).

Escenarios del lado de la demanda

Rendimiento de la ganadería

Comenzamos describiendo cómo cambia la eficiencia de la producción ganadera (tanto de carne como de lácteos) a lo largo del tiempo en nuestros escenarios. En todos los escenarios, los cambios en la eficiencia de los monogástricos (principalmente aves y cerdo) se basan en las tendencias regionales. En

el caso de los pequeños rumiantes (ovejas y cabras), los cambios en la eficiencia se basan en los cambios del sector de la carne de res. Los cambios en el sector de la carne de res y los productos lácteos se producen de la siguiente manera.

Los cambios de eficiencia en el sector de la carne de res y los productos lácteos tienen dos fuentes. En primer lugar, modelamos un aumento autónomo de la eficiencia, correspondiente a los cambios en el manejo de rebaños y en la salud animal. Para los escenarios de producción Ambiciosa y Avanzada, añadimos un aumento del 25% en la eficiencia tendencial, lo que supone un aumento del 4% de la eficiencia en general (el escenario de producción Razonable sigue la línea de base).

En segundo lugar, todos los escenarios incluyen un cambio de los sistemas ganaderos utilizados en 2010 a sistemas más eficientes, ya sea con más concentrados o con más pasturas digeribles, añadiendo sistemas modelados como en Herrero et al (2013). Las proyecciones de producción por cabeza se convierten en eficiencia insumo-producto mediante una regresión de panel en Herrero et al., (2013) y Wirsenius et al., (2010), en la que ambos dan el mismo valor para el resultado de la regresión del coeficiente exponencial. En todos los escenarios, el objetivo de aumento de la eficiencia general se basa en la tendencia de la eficiencia insumo-producto. El aumento del rendimiento de pasturas se basa en una tendencia a escala mundial. Se elige un cambio a sistemas más eficientes dentro de cada zona climática (árida, húmeda y templada) para coincidir un objetivo de aumento de la eficiencia. El objetivo de eficiencia se elige a su vez para cerrar la brecha de eficiencia relativa, con respecto a la región líder mundial (Rusia o Estados Unidos), en la misma cantidad en todos los países. El cuadro 2 del Apéndice muestra los rendimientos en 2010 y 2050.

Las reglas acerca de las áreas de pastizales exigen que las zonas de pastizales áridos sean las mismas en todos los escenarios, ya que los pastizales áridos solo pueden utilizarse para el ganado. La proporción de zonas de pastizales húmedos y templados también se mantiene constante, ya que la proporción actual de zonas de pastizales húmedos y templados es representativa del tamaño de la región. Los parámetros comerciales se ajustan de manera que la distribución mundial de la producción se ajuste y las regiones más eficientes ganen algunas cuotas. En el caso de los productos lácteos, parte del aumento de la producción se realiza a nivel local. El resultado de estos supuestos es un aumento relativamente moderado de las zonas de pasturas.

Obtenemos las tasas actuales de carga ganadera reduciendo los datos del sector ganadero sobre las pasturas y las cifras de las cabezas de ganado declaradas por los países. Dichas tasas son bastante diferentes entre las subregiones de América Latina y el Caribe en el año de referencia. En el caso de la carne de res, los valores oscilan entre 0,3 para México y 1,4 para el Caribe. Las tasas de carga ganadera en el sector lácteo son habitualmente más bajas.

Cuadro 1 Tasas de carga ganadera en el año de referencia (2010) en unidades de ganado tropical (UGT) por hectárea, subregiones de América Latina y el Caribe.

	Tasa de carga ganadera sector de carne de res	Tasa de carga ganadera sector de lácteos
Brasil	0,98	0,68

México	0,33	0,31
Los Andes	0,52	0,25
El Caribe	1,47	1,12
América Central y las Guyanas	1,08	0,63
Cono Sur	0,41	0,28
América Latina y el Caribe	0,62	0,43

América del Norte se sitúa en 0,4 unidades de ganado tropical por hectárea en el caso de la carne de res, mientras que la UE es muy superior, con 2,4. Las diferencias dentro de América Latina y el Caribe corresponden, en parte, a los distintos climas, con diferentes cuotas de zonas áridas, húmedas y templadas. De hecho, en los climas ecuatoriales o subtropicales húmedos se pueden alcanzar mayores rendimientos potenciales de los pastos. No obstante, el clima no es el principal impulsor de la intensificación del uso de pastizales; pues factores como la disponibilidad del uso del suelo, los precios y la disponibilidad de los insumos, la distancia a las infraestructuras y las opciones de manejo desempeñan un papel importante. Según las publicaciones, Strassburg et al. 2014 para Brasil o Landholm et al. 2019 para las regiones húmedas de Colombia, las tasas de carga ganadera podrían multiplicarse por 3 de forma sostenible en estos entornos.

En la línea de base, el rendimiento de los pastos aumenta en cada subregión un 26% entre 2010 y 2050, siguiendo la tendencia mundial (el cuadro 1 del Apéndice muestra los valores en 2010). También se establece un escenario de mayor incremento para América Latina y el Caribe, con un aumento del 200% para las zonas húmedas y del 150% para las zonas templadas de las subregiones de los Andes y Brasil, basado en Strassburg et al. 2014 y Landholm et al. 2019, y un aumento del 100% para las zonas húmedas y del 50% para las zonas templadas de las demás regiones de América Latina y el Caribe, con climas subtropicales menos favorables en lugar de climas ecuatoriales. En las regiones húmedas, este rendimiento de los pastos puede interpretarse como el paso a sistemas silvopastoriles. De hecho, aunque no hacemos un seguimiento por separado del carbono almacenado en los árboles y de aquél almacenado en las zonas reforestadas (ya que carecemos de los datos necesarios), nuestro modelo presupone que todos los suelos no utilizados para la producción de alimentos se reforestan implícitamente. Esto hace que sea equivalente aumentar el rendimiento de los pastos y aumentar el carbono capturado en árboles en los sistemas silvopastoriles.

Rendimiento de los cultivos

La bioenergía no desempeña un papel importante en nuestros escenarios, dado el ambiguo efecto sobre las emisiones globales de GEI indicadas en las publicaciones. En particular, no modelamos ninguna bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS). La viabilidad de la BECCS a gran escala desde el punto de vista comercial, financiero y de economía política, así como su coherencia con los objetivos de conservación de la biodiversidad, el suelo y el agua, ha sido muy cuestionada (Gasser et al., 2015; Heck et al., 2018; Smith et al., 2016; Turner et al., 2018). Los problemas de la tecnología de captura y almacenamiento de carbono son, entre otros, que no está demostrada industrial y

comercialmente (podría producirse una fuga de CO₂, o resultar en costos prohibitivos para los usuarios) y que la disponibilidad de lugares de almacenamiento de CO₂ no es algo que se dé por sentado.

La agricultura de labranza reducida o nula, con cultivos de cobertura, ya está muy desarrollada en América Latina y el Caribe en la agricultura convencional. Consiste principalmente en el uso de herbicidas combinados con cultivos modificados genéticamente resistentes a los herbicidas (Castanheira et al. 2013). Suponemos que esto está en la línea de base.

Los cambios en el rendimiento de las tierras de cultivo en la línea de base se basan en Alexandratos et al. (2012). Los tres escenarios del lado de la oferta suponen un aumento del 5% en la intensidad de los cultivos. El aumento de los rendimientos de los cultivos se modifica con un 20% más de cambio que en la línea de base en la variante de producción Ambiciosa y un 50% más de cambio en la variante de producción Avanzada.

Nitrógeno

Las diferentes subregiones de América Latina y el Caribe actualmente tienen eficiencias bastante diferentes en el uso del nitrógeno (EUN). El Cono Sur y Brasil tienen una EUN del 0,67 y 0,54 respectivamente, similar a la de los países de la OCDE, México 0,4 y otras subregiones alrededor del 0,3 (Zhang et al., 2015). El predominio de la soja en el Cono Sur y Brasil es importante para explicar los mayores niveles de EUN.

Modelamos un aumento del 20% de la EUN para el escenario de producción Razonable, llenando un vacío en la eficiencia de 50% para el escenario de producción Ambiciosa y 75% para el de Avanzada. La EUN del Cono Sur en el escenario de producción Avanzada llega al 0,8, lo que sería bastante difícil de alcanzar. Para alcanzar estos niveles tan altos será necesario utilizar opciones tecnológicas avanzadas (como los fertilizantes nitrogenados recubiertos) y movilizar más cultivos intercalados de leguminosas y otros cultivos, como maíz. Para las subregiones que comienzan en 0,3, la EUN en el escenario de producción Avanzada se eleva por encima de 0,5. Aunque el cambio es importante, estos niveles serían más fáciles de alcanzar gracias a factores como el aumento del rendimiento general, el fraccionamiento de las dosis de nitrógeno y la incorporación de leguminosas en las rotaciones.

Otros cambios tecnológicos

Las opciones tecnológicas del lado de la oferta que modelamos se centran en lo siguiente (todas las reducciones se describen en relación con la mejora de la línea de base en 2050),

- reducciones de las emisiones entéricas, utilizando agentes antimicrobianos, con diferentes supuestos sobre la absorción. Estas opciones se modelan de forma idéntica para América Latina y el Caribe y el resto del mundo, ya que se supone que los agentes antimicrobianos son aplicables en todas partes.
 - En el escenario de producción Razonable, 7,5% de carne de res y 15% de productos lácteos

- En el escenario de producción Ambiciosa, 5% de pequeños rumiantes, 15% de carne de res y 30% de productos lácteos
- En el escenario de producción Avanzada, 30% para cada sector
- manejo del estiércol, pasando de sistemas de manejo en húmedo a sistemas de manejo en seco; adoptando una metanización eficiente sin utilizar productos agrícolas y aumentando la frecuencia de aplicación de estiércol.
 - En el escenario de producción Razonable, suponemos una reducción del 40% del metano procedente del estiércol que se maneja en húmedo, y una mitigación del 20% del óxido nitroso procedente de los sistemas en seco para carne de cerdo y una mitigación del 10% del óxido nitroso procedente de los sistemas en seco para carne de res y productos lácteos.
 - En el escenario de producción Ambiciosa, suponemos reducciones del 60%, 35% y 20% respectivamente.
 - En el escenario de producción Avanzada, suponemos reducciones del 80%, 50% y 30%.
- emisiones de deposición de nitrógeno de las pasturas, mediante la plantación de pastos que segreguen inhibidores de nitrificación, en sistemas no áridos. Modelamos diferentes ambiciones de penetración: ninguna en Razonable, 20% en Ambiciosa y 40% en Avanzada. Estos escenarios son particularmente adecuados para América Latina y el Caribe, ya que los pastos que producen inhibidores biológicos de la nitrificación son nativos de esa región (Subbarao et al. 2012).
- mitigación de las emisiones de metano del arroz con un porcentaje de reducción simple y reducción múltiple del 25%, y cambios en el manejo de residuos (para todo el escenario del lado de suministro), y un aumento adicional del 20% del rendimiento del arroz en el escenario de producción Avanzada lo que permite disminuir aún más el área, con emisiones de metano relacionadas principalmente con las áreas de arroz bajo agua. Estas opciones de mitigación con la inundación y el manejo de residuos coinciden con las publicaciones sobre América Latina y el Caribe. La amplitud de los efectos de los cambios en las prácticas para la mitigación de las emisiones del arroz podría ser diferente de la presentada en estudios encontrados para América Latina y el Caribe, pero los resultados de esos estudios son divergentes y no están claramente explicados, por lo que utilizamos las cifras de los escenarios globales de Searchinger et al (2019).

También modelamos los cambios en las emisiones directas de GEI del uso de energía en los escenarios de producción Ambiciosa y Avanzada, en relación tanto con el uso directo de energía en la agricultura como con la producción de insumos. Estos escenarios corresponden tanto al aumento de la eficiencia como al cambio de la fuente de energía, pasando a la electricidad libre de carbono. Siguiendo a Searchinger et al (2019) modelamos

- en la producción Ambiciosa, -37% para la síntesis de nitrógeno y el uso directo de energía en la agricultura, -50% para el uso de energía de los productos hidrobiológicos y para la producción de otros insumos
- en la producción Avanzada, -75% para toda la producción de insumos y el uso de energía de los productos hidrobiológicos y -62,5% para el uso directo de energía en la agricultura

Los escenarios de reducción del estiércol, la eficiencia en el uso del nitrógeno y los escenarios de uso directo de la energía son coherentes con la evidencia en las publicaciones estudiadas en la sección anterior, pero sobrepasan la mayor eficiencia descrita en las publicaciones.

Cambios en el lado de la demanda, dietas y desperdicios

No hay muchos escenarios de opciones de reducción de emisiones por el lado de la demanda centrados en América Latina y el Caribe. Aquí, desarrollamos escenarios del lado de la demanda basados en escenarios mundiales de Searchinger et al, 2019, con un enfoque en la modelación de la reducción del consumo de carne de res y la comparación de los efectos de la reducción de diferentes tipos de productos ganaderos.

El cambio de dieta en la línea de base sigue los escenarios de la FAO (Alexandratos et al., 2012), con el supuesto adicional de que cada país obtiene un mínimo de 3000 kcal/cap/día de energía alimentaria disponible para 2050 en todos los escenarios. Este supuesto adicional no afecta directamente nuestra modelación de América Latina y el Caribe, ya que en la línea de base de la FAO todas las subregiones o países de la región superan este umbral. El escenario de la FAO propone aumentos importantes del consumo general y, en particular, de la carne de res: más del 50% para México y el Caribe, 35% para la región de los Andes, América Central y las Guayanas, y 14% para Brasil, donde el consumo ya es muy elevado en comparación con el resto del mundo, y 5% para el Cono Sur.

En la dieta "Moderada de carne de res a otros animales", se conserva el cambio de la línea de base en la carne (medido en energía total disponible), pero se sustituye parte de la carne de res por carne monogástrica (cerdo y aves de corral). Los cambios se calculan usando el tamaño de la región de la FAO y se reparten proporcionalmente entre los países. América Latina y el Caribe constituye una región en la agregación regional de la FAO. Para las subregiones con bajo consumo de carne de res (menos de 60 kcal/pers/día) se modela un aumento máximo del 50% de la carne de res, con un tope de 60 kcal/pers/día. Para las regiones con un consumo elevado de carne de res, se disminuye el consumo utilizando la continuación de la tendencia (para Estados Unidos y la Unión Europea) o una tendencia similar a la disminución de EE. UU. para otras regiones (incluyendo América Latina y el Caribe). Además, se aplica una reducción del 10% de pérdidas y desperdicios.

La dieta evaluada en el escenario "Ambiciosa de carne de res a verduras" se centra en modelar el impacto del consumo de carne de res. En este escenario, el 30% del consumo mundial de carne de res en el escenario de línea de base se sustituye por una mezcla de legumbres (p. ej., lentejas, frijoles y arvejas) y soja, utilizando un equivalente energético, empezando por los países donde el consumo de carne de res es más elevado. Algunos países de América Latina y el Caribe reducen drásticamente su

consumo de carne de res; por ejemplo, Argentina y Uruguay en un 85%, y Brasil, Paraguay, Ecuador, Bolivia y Chile entre un 60% y un 65%. A modo de comparación, EE. UU. y los países de la UE reducen su consumo en un 40%. Barbados, las Bahamas y las islas Bermudas también lo reducen entre el 58% y el 80%. Por el contrario, muchos países como Nicaragua, El Salvador, Jamaica o Guyana siguen por debajo del umbral y, por tanto, no recortan su demanda en absoluto, en comparación con la línea de base. La mayoría de los demás países de América Latina y el Caribe se encuentran en un punto intermedio y no recortan mucho su consumo en este escenario.

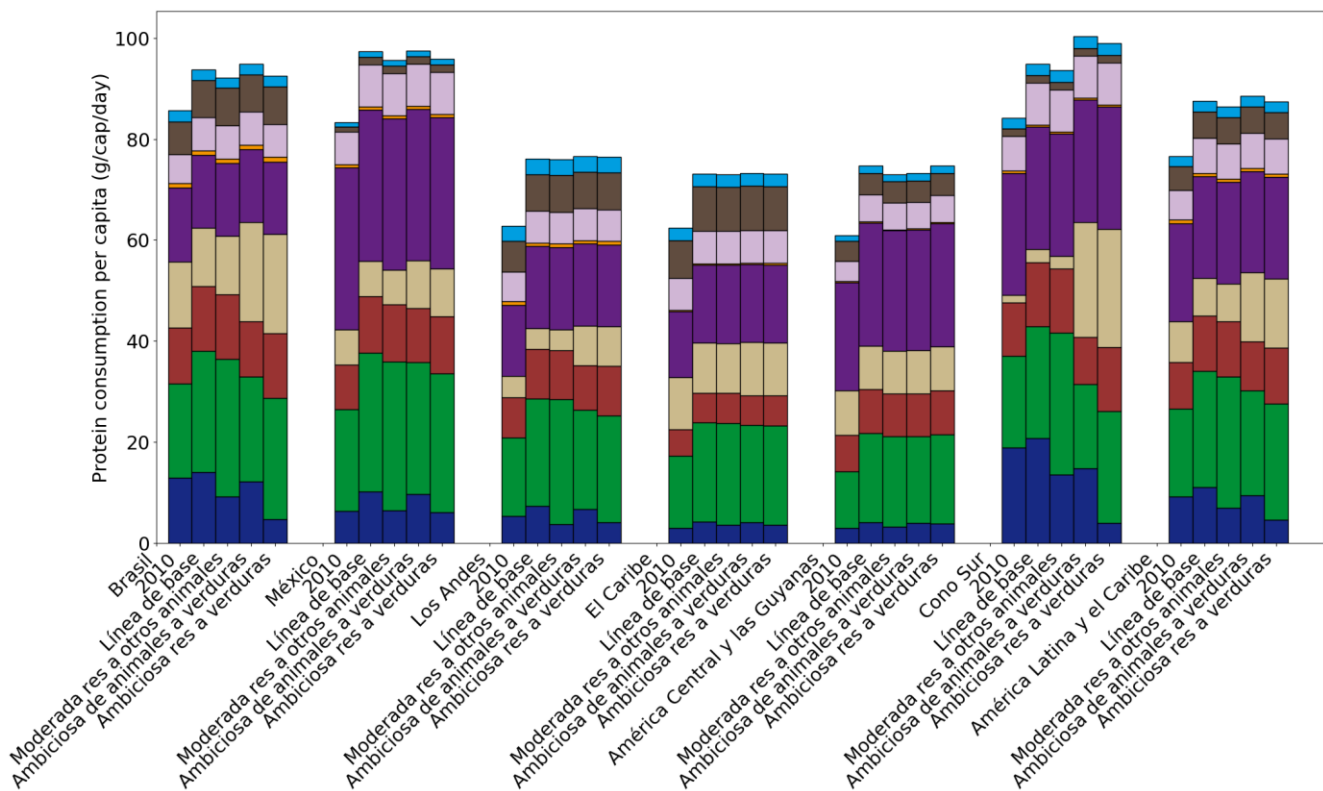
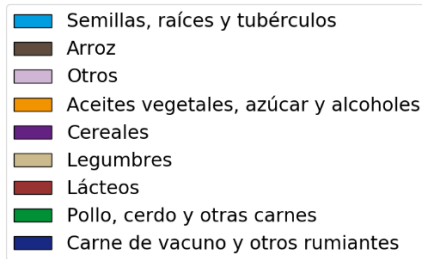


Gráfico 1: Dietas por región y escenario, en proteínas

En el escenario "Ambiciosa de animales a verduras", se mantiene la misma disminución del consumo total de energía de productos animales que en el escenario "Ambiciosa de carne de res a verduras" para tener una dieta comparable, pero el cambio se reparte entre todos los productos animales, incluidos los lácteos, manteniendo la proporción relativa entre los productos animales como en el año de referencia.

En ambos escenarios de dietas Ambiciosas, se aplica una reducción del 25% de pérdidas y desperdicios.

Las dietas futuras resultantes, así como el año de referencia (2010), se muestran en el gráfico 1. El consumo de frutas y verduras se incluye en "Otros" y no varía entre los distintos escenarios. El Apéndice muestra las dietas en términos de energía disponible y consumida (mostrando el efecto de la reducción de residuos).

Resultados

Escenarios del lado de la demanda

Eficiencia del ganado y rendimiento de los cultivos

En primer lugar, consideramos el impacto de nuestras opciones de modelación en las estadísticas de producción alimentaria agregada.

Esto es lo que ocurre con la intensificación ganadera en nuestra línea de base. A nivel global, seguir las tendencias de la eficiencia de la carne de res y los productos lácteos conduce a un cierre de la brecha de eficiencia del 75% para la carne de res y del 65% para los productos lácteos. El cambio de sistemas de intensificación ganadera en América Latina y el Caribe en la línea de base depende de la subregión.

México es bastante especial, ya que, para la carne de res, los sistemas húmedos y templados tienen eficiencias mucho más altas que los sistemas áridos. Por lo tanto, el objetivo de cierre de la brecha de eficiencia en la línea de base puede alcanzarse aumentando la producción en los sistemas húmedos y templados, sin necesidad de cambiar de sistema (esto, sin embargo, aumenta las emisiones del cambio del uso del suelo). Por el contrario, en el caso de los productos lácteos, es necesario cambiar a sistemas que utilicen más concentrados.

Otras subregiones necesitan menos cambio en los sistemas para alcanzar su objetivo de cierre de la brecha de eficiencia. Los porcentajes de cambio no son tan importantes en el caso de la carne de res, alrededor del 12% - 15%, salvo en el Caribe (25%), y son más importantes en el caso de los lácteos, alrededor del 40%, salvo en el Cono Sur y Brasil (15% - 20%). La mayoría de los cambios de sistema son hacia más granos en la ingesta de rumiantes, pero también hay cambios hacia pastos más digeribles, sobre todo en algunos sistemas húmedos.

En el Cono Sur y en México, los efectos generales de estos cambios hacen que las necesidades totales de piensos para la producción de carne de res (medidas como materia seca de los piensos sobre la producción de carne de res) se sitúen en los niveles de eficiencia de la UE o Estados Unidos. En América Central y las Guyanas, los Andes y Brasil, las necesidades de piensos para la carne de res pasan de ser el doble que en Estados Unidos y la Unión Europea a ser un 45% más. El Caribe parte de unas necesidades de piensos más elevadas y sigue estando retrasada en 2050 en la línea de base. En el caso de los productos lácteos, los resultados son similares, salvo que el Caribe se asemeja a Centroamérica y las Guyanas, los Andes y Brasil. Esta opción puede impulsarse más para algunas subregiones de América Latina y el Caribe, pero si se siguen las tendencias a escala mundial, con el

aumento de la terminación de las unidades de engorde y el aumento de la digestibilidad de las pasturas, se podría obtener la mayor parte de lo que se necesita. Esto podría seguir siendo un desafío, ya que implica evitar la cría de ganado extensiva y relativamente ineficiente que suele estar presente en las fronteras en América Latina y el Caribe (p. ej., en Brasil, los Andes y Chacos).

Los escenarios del manejo de estiércol se traducen, para toda América Latina y el Caribe, en un -11%, -21% y -28% de las emisiones del manejo del estiércol en los escenarios de producción Razonable, Ambiciosa y Avanzada, respectivamente, en comparación con la línea de base. En el escenario de producción Avanzada, esto lleva a que las emisiones del manejo de estiércol no cambien en 2050 en comparación con el año de referencia (2010). Se obtienen cifras similares para las subregiones, con un +/- 4% en el escenario de producción Avanzada en función de la estructura ganadera de la región.

Para reportar el efecto de las mejoras en el rendimiento, comparamos el uso del suelo en 2050 de los diferentes escenarios con el que se obtendría si la producción del año de referencia se obtuviera a partir de los rendimientos en el 2050. (Esto permite desentrañar el impacto de una canasta cambiante de cultivos producidos). En el escenario de línea de base, el aumento del rendimiento general obtenido de este modo oscila entre el 37% (Cono Sur) y el 52% (el Caribe y América Central y las Guyanas). En el escenario de producción Ambiciosa, el rendimiento general aumenta entre un 50% y un 70%, y en la variante de producción Avanzada entre un 60% y un 87%.

Emisiones en América Latina y el Caribe

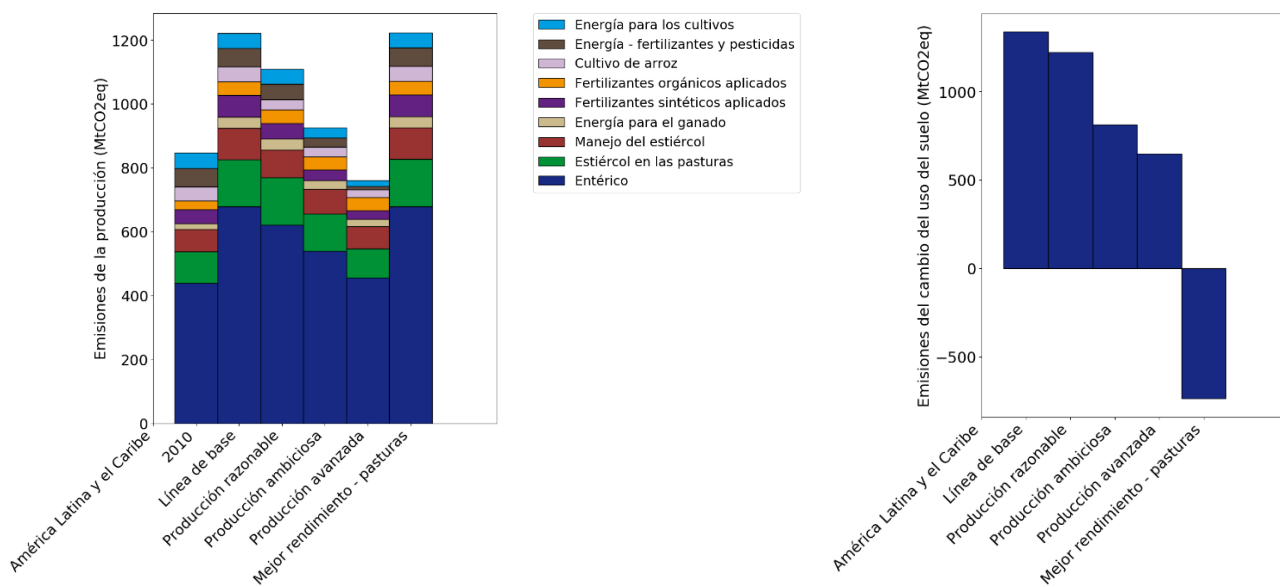


Gráfico 2: Emisiones de la producción y del uso del suelo en los escenarios del lado de la oferta

Pasamos ahora a analizar el impacto de las opciones del lado de la oferta sobre las emisiones (gráfico 2 – véase el apéndice para los resultados de las subregiones). En estos escenarios, la producción de la región se ve impulsada por los cambios en la dieta de la línea de base, tanto en la región como a nivel mundial a través de las exportaciones. En el escenario de producción Avanzada, las emisiones se

reducen un 33% respecto a la línea de base, pero solo un 10% en comparación con el año de referencia debido al aumento de la demanda. Dado que en el escenario de producción Avanzada no hay mucha eficiencia adicional, sobre todo opciones tecnológicas para reducir las emisiones de la producción, las emisiones del uso del suelo no se reducen mucho en comparación con la línea de base. El aumento del rendimiento de las pasturas en el escenario "Mejor rendimiento de las pasturas" tiene un efecto importante en las emisiones derivadas del cambio del uso del suelo, lo que lleva a una importante reforestación.⁷ El Apéndice muestra los resultados por subregión. Brasil domina la reducción de emisiones, debido a su tamaño y a la importancia de la carne de res en el país.

El impacto de las emisiones sobre el comercio

Las emisiones medidas en América Latina y el Caribe solo reflejan parcialmente los efectos de las emisiones del lado de la oferta. De hecho, las exportaciones aumentan las emisiones de la región, pero disminuyen la necesidad de producción en otros lugares. Los efectos generales de las exportaciones dependen de la comparación de las intensidades de las emisiones regionales con aquellas a nivel mundial. Para cuantificar este problema, evaluamos las emisiones en América Latina y el Caribe y a nivel mundial en los distintos escenarios. También consideramos escenarios en los que las exportaciones de la región se fijan en el nivel del año de referencia (etiquetado en el gráfico como RefX).

El gráfico 3 compara las emisiones directas cuando se miden a nivel mundial y regional, y cuando las exportaciones son fijas (a valores bajos de 2010) frente a exportaciones endógenas (a valores más altos para 2050). Los resultados muestran que el aumento de las exportaciones de América Latina y el Caribe no tiene un impacto significativo en las emisiones directas mundiales. Si solo se consideran las emisiones de América Latina y el Caribe, se podría concluir erróneamente que la disminución de las exportaciones permitió reducir las emisiones de la producción en aproximadamente un 30%. Pero los alimentos que no son importados de la región deben producirse en otros lugares, lo que significa que las emisiones en otros lugares compensarán y, en realidad, incluso anularán esa ganancia. De hecho, los productores regionales de alimentos son igual de intensivos en GEI que los exportadores del resto del mundo.

⁷ Obsérvese que nuestros escenarios se basan en supuestos de demanda exógena. En realidad, mejorar el rendimiento de la carne de res sin proteger los bosques o moderar la demanda nacional e internacional de la carne de res podría conducir a una producción de carne de res más barata, aumentar la demanda nacional, las exportaciones y la producción de la carne de res, así como incrementar la deforestación

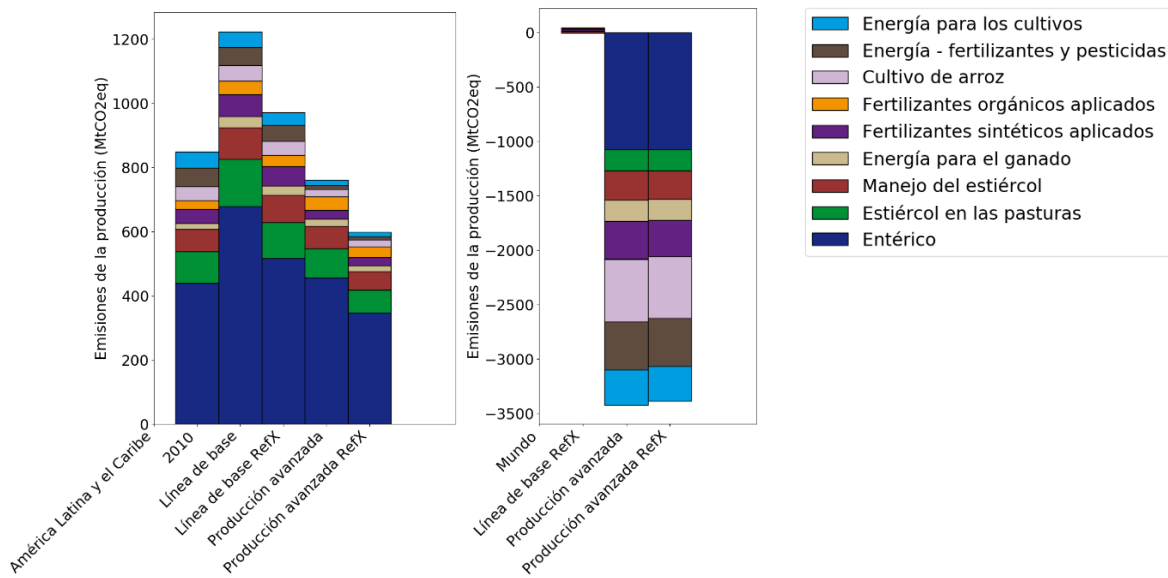
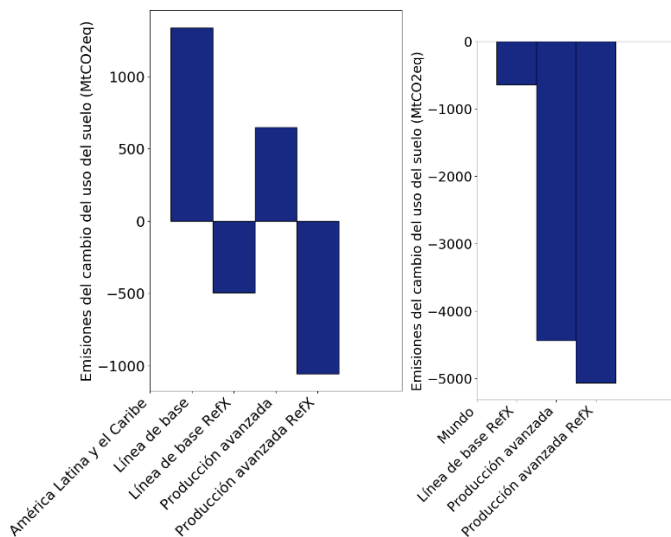


Gráfico 3: Emisiones de producción en América Latina y el Caribe y diferencia de las emisiones de producción a escala mundial con la línea de base, con y sin exportaciones fijas

Sin embargo, la consideración de las emisiones relacionadas con el cambio del uso del suelo muestra el valor de la disminución de las exportaciones de la región. El gráfico 4 muestra que pasar de las exportaciones endógenas altas a la exportación de referencia más baja ahorraría alrededor de 1,5 GtCO₂ en la región, y cerca de 0,6 GtCO₂ en todo el mundo después de contabilizar la necesidad de producir en otros lugares. Esto demuestra que América Latina y el Caribe alberga un ecosistema con altas reservas de carbono, y que existe un costo de oportunidad en el uso del suelo en la región para producir alimentos, en comparación con la tierra disponible en otros lugares.

Gráfico 4: Emisiones del cambio del uso del suelo en América Latina y el Caribe y diferencia de las emisiones del cambio del uso del suelo a escala mundial con la línea de base, con y sin exportaciones fijas



Escenarios del lado de la demanda

La comparación de los escenarios de la demanda muestra que la carne de res es un objetivo más relevante que los productos animales (gráfico 5 – véase el apéndice para los resultados de las subregiones). De hecho, el escenario ambicioso, centrado en la carne de res, conduce a una reducción de más del doble de las emisiones directas que el escenario que reduce todos los productos animales. Un cambio moderado de la carne de res a otros productos animales reduce las emisiones de la producción más que una reducción ambiciosa de todos los productos animales. El patrón es aún más notable para las emisiones derivadas del uso del suelo, un objetivo de reducción moderada para la carne de res revierte la deforestación, mientras que una reducción ambiciosa para todos los productos animales no lo hace.

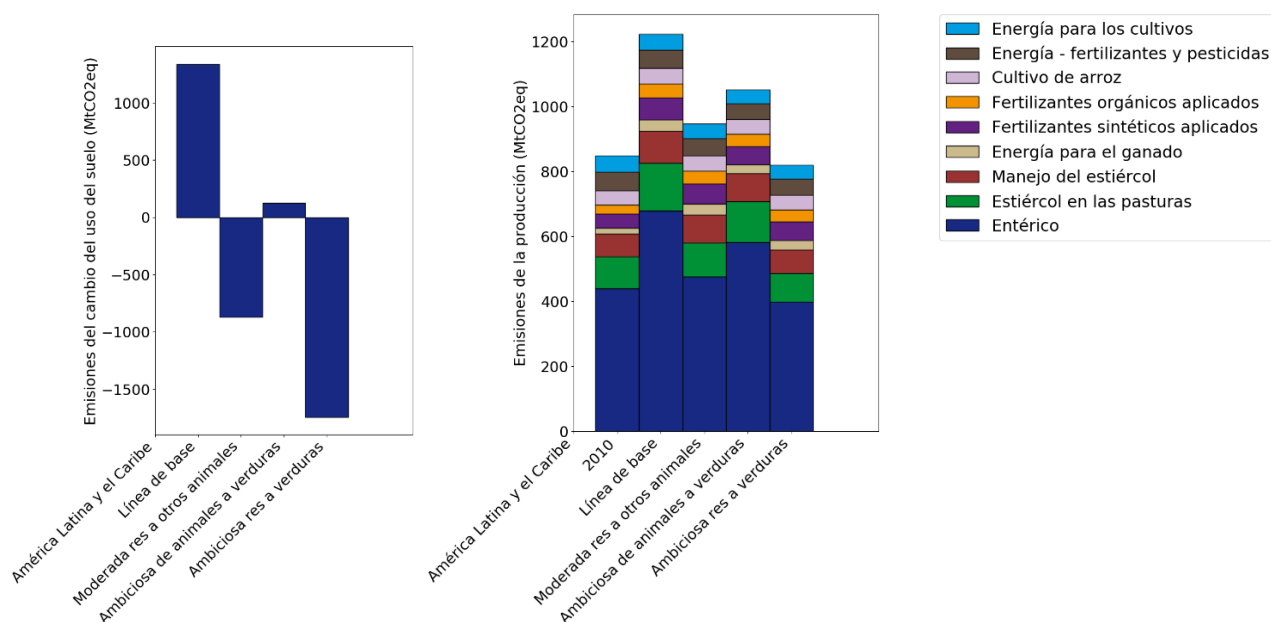


Gráfico 5: Emisiones de producción y uso del suelo por escenario de dieta

La comparación de los escenarios de oferta y demanda muestra que los escenarios de solo demanda y de solo oferta producen una reducción de las emisiones de la misma magnitud y pueden lograr más en términos de reducción de las emisiones del cambio del uso del suelo que de las emisiones directas. El aumento del rendimiento de las pasturas, como hemos visto anteriormente, también conduce a una importante disminución de las emisiones relacionadas con el uso del suelo.

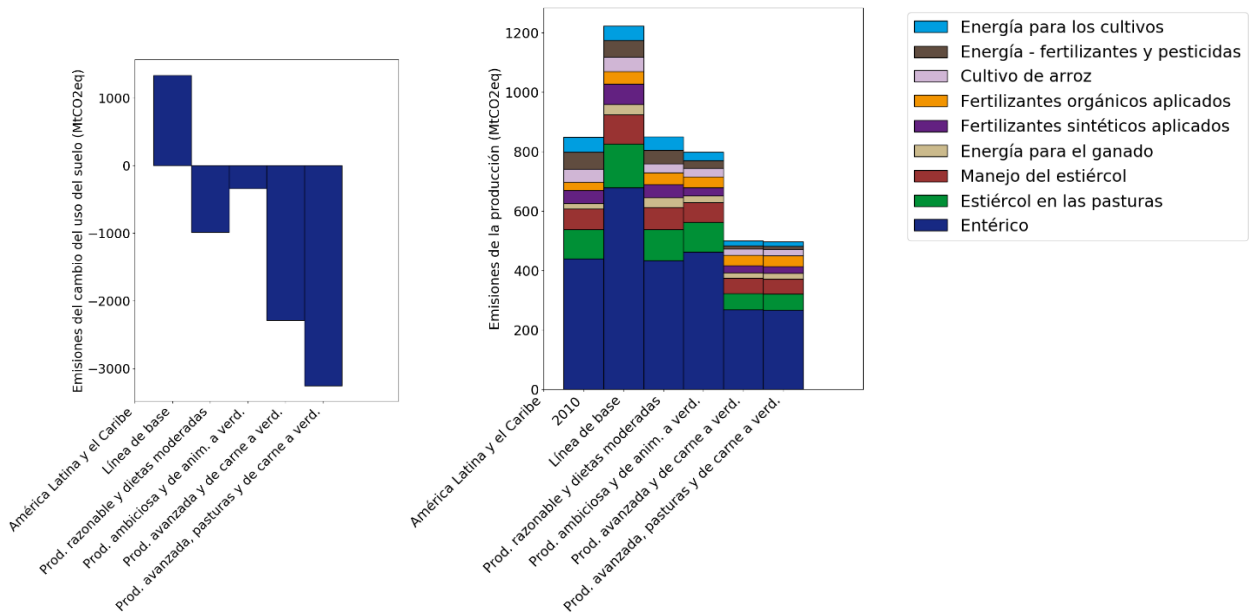


Gráfico 6: Emisiones de la producción y del uso del suelo en escenarios combinados de oferta y demanda

La combinación de cambios en la demanda y en el proceso de producción reduce las emisiones de la producción, aproximadamente un 60% menos que en la línea de base de 2050 y un 40% menos que en el año de referencia 2010 (gráfico 6, véase el apéndice para los resultados de los países). La combinación también libera tierras para permitir que la vegetación natural vuelva a crecer.

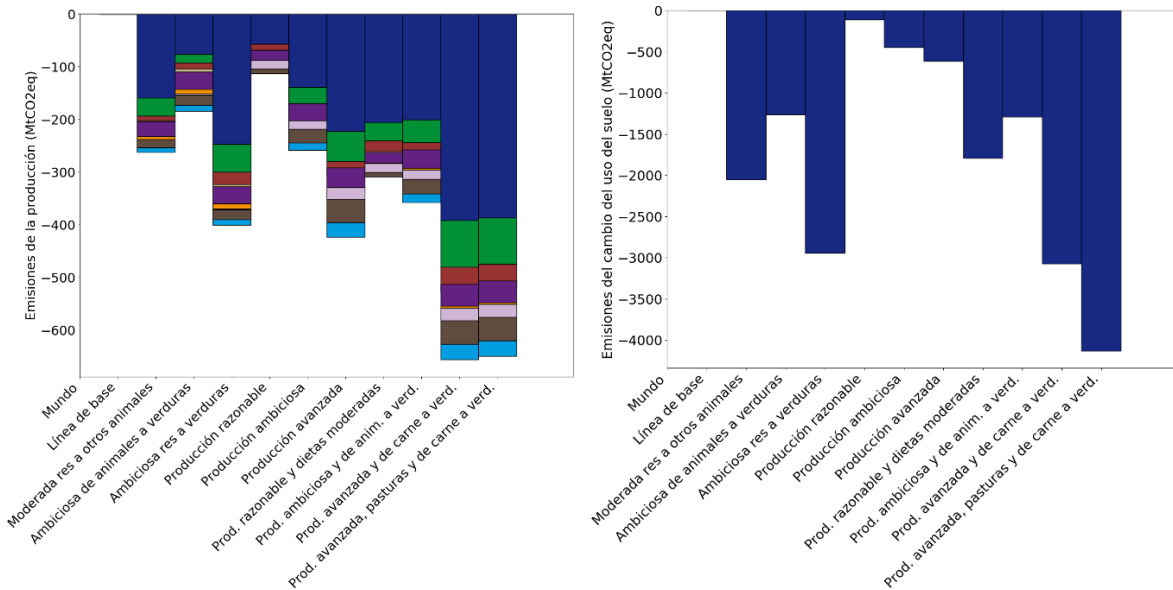


Gráfico 7: Impacto de los escenarios de oferta y demanda de América Latina y el Caribe en las emisiones globales cuando el resto del mundo se mantiene en su línea de base (diferencia con las emisiones de la línea de base)

El gráfico 7 muestra el impacto de las dietas de América Latina y el Caribe y de los escenarios de oferta sobre las emisiones globales, suponiendo que el resto del mundo se mantiene en la línea de base (véase el apéndice para los resultados de las subregiones). Si se aísla el efecto de los cambios en la región de América Latina y el Caribe sobre las reducciones globales para las combinaciones de reducción de emisiones de la demanda y la producción, se obtienen reducciones similares a las obtenidas en los escenarios en los que el resto del mundo también cambia y los cambios en las emisiones solo se evalúan en la región de América Latina y el Caribe.

Discusión y conclusión

Nuestros resultados indican que es necesario movilizar tanto las opciones de la demanda como de la oferta para que el sistema alimentario sea coherente con cero emisiones netas. Incluso en los escenarios más ambiciosos, las emisiones de la producción siguen estando lejos de cero. Las emisiones residuales de la agricultura, y especialmente de la ganadería, son inevitables. Para compensar las emisiones, es esencial recuperar la vegetación natural. Esto a su vez, requiere reducir la demanda, especialmente de la carne de res, y aumentar el rendimiento, sobre todo el de las pasturas.

Por el lado de la demanda, la reducción del consumo medio de carne de res puede hacer que las dietas regionales sean menos desiguales. En la actualidad, la región alberga a los países con mayor consumo de carne de res per cápita del mundo, así como a países con niveles de consumo muy bajos.

La reducción de las emisiones de la producción requiere un enfoque integrado, con importantes márgenes de mejora para el uso del nitrógeno, las emisiones del arroz y el uso directo de la energía. Pero la reducción de las emisiones relacionadas con la carne de res dominará los niveles absolutos de la reducción de emisiones. Las emisiones de metano entérico y de óxido nitroso en las pasturas son opciones clave para reducir las emisiones directas. Las mejoras en la eficiencia pueden desempeñar un papel, pero la selección de alimentos para modificar el rumen microbiano y el estiércol que se deja en las pasturas son las principales opciones para reducir las emisiones de metano y óxido nitroso.

Si los países de América Latina y el Caribe mantienen el ritmo de aumento de la eficiencia con el resto del mundo, las exportaciones pueden sustituir las producciones de otros países, o disminuir, sin grandes consecuencias, las emisiones directas de la producción. Sin embargo, la región alberga ecosistemas con altas reservas de carbono, lo que sugiere que las exportaciones de la región pueden provocar una deforestación neta a escala mundial.

Nuestro trabajo tiene limitaciones. Una de ellas es que nos enfrentamos a varios desafíos relacionados con la disponibilidad de datos. No había disponibles datos a gran escala sobre las prácticas agrícolas de todos los países de América Latina y el Caribe. En particular, no se encuentran datos de GEI de la agricultura intensiva diversificada basada en la agroecología, salvo de la agroforestería del cacao y el café, para la cual sí hay datos, aunque no en un solo estudio. El aumento del rendimiento de las pasturas es especialmente relevante para América Latina y el Caribe, pero solo hemos podido encontrar un estudio a nivel de país para ponerle cifras. El uso de la ganadería en algunos países para blanquear dinero del narcotráfico puede introducir sesgos, pero no creemos que esto afecte nuestras conclusiones.

Otra limitación es que, aunque los agricultores pueden tener diferentes capacidades para implementar cambios en la oferta cuando producen para su propio consumo, para los mercados locales y para los mercados internacionales, no encontramos datos que permitieran modelarlos por separado. El tipo y el tamaño de los agricultores pueden ser dos cosas diferentes: los agricultores de cacao y café descritos en los análisis del ciclo de vida suelen ser pequeños cultivadores que producen para los mercados internacionales.

Las estrategias de uso del suelo descritas en nuestros escenarios también podrían repercutir en dimensiones o indicadores que no hemos considerado. Por ejemplo, los cambios en la dieta podrían tener repercusiones en la distribución dentro de cada país. Aunque en un análisis preliminar, que no se muestra aquí, encontramos que la proporción de productos animales y la proporción de carne de res en los gastos relacionados con la alimentación en Argentina es más o menos constante en todas las clases de ingresos, se necesita investigar más a fondo este tema. Además, tanto los cambios en el lado de la demanda como en el de la oferta podrían tener repercusiones en el empleo y los ingresos rurales, que no hemos considerado (véase también Saget et al, 2020).

En general, nuestros escenarios son coherentes con una estrategia que consiste en dejar terrenos a la naturaleza para reducir al máximo las emisiones de GEI y almacenar el carbono en la vegetación natural, de forma ambiciosa pero factible. Para mantener las emisiones negativas derivadas de los cambios del uso del suelo después de 2050 sería necesario seguir reduciendo el impacto en el suelo de la producción de alimentos.

Agradecimientos

Este documento fue financiado por el Programa de Trabajo Económico y Sectorial (RG-E1741) del del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Los autores agradecen a Nadine Andrieu, Allen Blackman, Ana María Ibanez, Catalina Marinkovic, Ana Ríos, Graham Watkins, a un revisor anónimo, y a los numerosos participantes del taller inicial celebrado en 2021 por sus útiles comentarios y opiniones. Agradecemos especialmente a Romina Ordoñez por su revisión exhaustiva. Todos los demás errores son de los autores.

Referencias bibliográficas

- Arango, J., Ruden, A., Martinez-Baron, D., Lobo-guerrero, A. M., Berndt, A., Chacón, M., Torres, C. F., Oyhantcabal, W., Gomez, C. A., Ricci, P., Ku-Vera, J., Burkart, S., Moorby, J. M., and Chirinda, N. (2020). Ambition meets reality: Achieving GHG emission reduction targets in the livestock sector of Latin America. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4:65.
- Alexandratos, Nikos, and Jelle Bruinsma. "World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision." (2012).
- Bai, X., Huang, Y., Ren, W., Coyne, M., Jacinthe, P.-A., Tao, B., Hui, D., Yang, J., and Matocha, C. (2019). Responses of soil carbon sequestration to climate-smart agriculture practices: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 25(8):2591–2606.
- Bartl, K., Gómez, C. A., and Nemecek, T. (2011). Life cycle assessment of milk produced in two smallholder dairy systems in the highlands and the coast of Peru. *Journal of Cleaner Production*, 19(13):1494–1505.

- Bataille, C., Waisman, H., Briand, Y., Svensson, J., Vogt-Schilb, A., Jaramillo, M., Delgado, R., Arguello, R., Clarke, L., Wild, T., Lallana, F., Bravo, G., Nadal, G., Le Treut, G., Godinez, G., Quiros-Tortos, J., Pereira, E., Howells, M., Buira, D., Tovilla, J., Farbes, J., Ryan, J., De La Torre Ugarte, D., Collado, M., Requejo, F., Gomez, X., Soria, R., Villamar, D., Rochedo, P., and Imperio, M. (2020). Rutas de descarbonización profunda en América Latina: Desafíos y oportunidades. BID. .
- Batista, E., Soares-Filho, B., Barbosa, F., Merry, F., Davis, J., van der Hoff, R., and Rajão, R. G. (2019). Large-scale pasture restoration may not be the best option to reduce greenhouse gas emissions in Brazil. *Environmental Research Letters*, 14(12):125009.
- Benavides, Carlos, L. Cifuentes, Manuel Diaz, Horacio Gilabert, Luis Gonzales, Diego Gonzalez, David Groves, et al. "Opciones para lograr la carbono-neutralidad en Chile: una evaluación bajo incertidumbre" Inter-American Development Bank, August 20, 2021.
- Beuchelt, T. D., Camacho Villa, C. T., Göhring, L., Hernández Rodríguez, V. M., Hellin, J., Sonder, K., and Erenstein, O. (2015). Social and income trade-offs of conservation agriculture practices on crop residue use in Mexico's central highlands. *Agricultural Systems*, 134:61–75. Biomass use trade-offs in cereal cropping systems: Lessons and implications from the developing world.
- Brito de Figueirêdo, M. C., Potting, J., Lopes Serano, L. A., Bezerra, M. A., da Silva Barros, V., Gondim, R. S., and Nemecek, T. (2016). Environmental assessment of tropical perennial crops: the case of the Brazilian cashew. *Journal of Cleaner Production*, 112:131–140.
- Calvin, K. V., Beach, R., Gurgel, A., Labriet, M., and Loboguerrero Rodriguez, A. M. (2016). Agriculture, forestry, and other land-use emissions in Latin America. *Energy Economics*, 56:615–624.
- Cardoso, A. S., Berndt, A., Leytem, A., Alves, B. J., das N.O. de Carvalho, I., de Barros Soares, L. H., Urquiaga, S., and Boddey, R. M. (2016). Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. *Agricultural Systems*, 143:86–96.
- Castanheira, É. G. and Freire, F. (2013). Greenhouse gas assessment of soybean production: implications of land use change and different cultivation systems. *Journal of Cleaner Production*, 54:49–60.
- CAT, 2021. Climate target updates slow as science ramps up need for action. *Climate Action Tracker*.
- Celis, J. E., Sandoval, N., and Wells, G. (2013). Carbon footprint estimation resulting from beef cattle at the Central irrigated valley, Bio-Bio region, Chile. *Annals of Agrarian Science*, 11(1).
- Cherubini, E., Zanghelini, G. M., Alvarenga, R. A. F., Franco, D., and Soares, S. R. (2015). Life cycle assessment of swine production in Brazil: a comparison of four manure management systems. *Journal of Cleaner Production*, 87:68–77.
- Chirinda, N., Arenas, L., Katto, M., Loaiza, S., Correa, F., Isthitani, M., Loboguerrero, A. M., Martínez-Barón, D., Graterol, E., Jaramillo, S., Torres, C. F., Arango, M., Guzmán, M., Avila, I., Hube, S., Kurtz, D. B., Zorrilla, G., Terra, J., Irisarri, P., Tarlera, S., LaHue, G., Scivittaro, W. B., Noguera, A., and Bayer, C. (2018). Sustainable and low greenhouse gas emitting rice production in Latin America and the Caribbean: A review on the transition from ideality to reality. *Sustainability*, 10(3). article number 671.
- Cordes, H., Iriarte, A., and Villalobos, P. (2016). Evaluating the carbon footprint of Chilean organic blueberry production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21:281–292. doi:10.1007/s11367-016-1034-8.
- de Oliveira Bordonal, R., de Figueiredo, E. B., and La Scala Jr, N. (2012). Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest, considering other conservationist management practices. *GCB Bioenergy*, 4(6):846–858.

- De Oliveira Silva, R., Barioni, L. G., Queiroz Pellegrino, G., and Moran, D. (2018). The role of agricultural intensification in Brazil's nationally determined contribution on emissions mitigation. *Agricultural Systems*, 161:102–112.
- de Souza, S. P., Pacca, S., de Ávila, M. T., and Borges, J. L. B. (2010). Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel. *Renewable Energy*, 35(11):2552–2561.
- Dendooven, L., Patiño-Zúñiga, L., Verhulst, N., K. K. B., García-Gaytán, A., Luna-Guido, M., and Govaerts, B. (2013). Greenhouse gas emissions from nontilled, permanent raised, and conventionally tilled beds in the central highlands of Mexico. In Kang, M. and SS, S. B., editors, *Combating climate change, an agricultural perspective*. CRC Press, Leiden, Netherlands.
- Dick, M., Abreu da Silva, M., and Dewes, H. (2015). Life cycle assessment of beef cattle production in two typical grassland systems of southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 96:426–434. Integrating Cleaner Production into Sustainability Strategies. doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.080.
- Dummett, Cassie, et al. *Illicit harvest, complicit goods. The State of Illegal Deforestation for Agriculture*. Report Forest Trends, 2021.
- EPA. EPA lifecycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable fuels. EPA-420-F-10-006, 2010.
- Fankhauser, S., Smith, S. M., Allen, M., Axelsson, K., Hale, T., Hepburn, C., Kendall, J. M., Khosla, R., Lezaun, J., Mitchell-Larson, E., Obersteiner, M., Rajamani, L., Rickaby, R., Seddon, N., & Wetzler, T. (2022). The meaning of net zero and how to get it right. *Nature Climate Change*, 12(1), 15–21. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01245-w>
- FAO. *The Future of Food and Agriculture—Alternative Pathways to 2050*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2018.
- FAO. *The State of Food and Agriculture: Moving Forward on Food Losses and Waste Reduction*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2019.
- FAOSTAT, 2021: FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/GT>.
- Fazekas, A., Bataille, C., Vogt-Schilb, A., 2022. Prosperidad libre de carbono: cómo los gobiernos pueden habilitar 15 transformaciones esenciales. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Galdos, M. V., Cerri, C. C., Lal, R., Bernoux, M., Feigl, B., and Cerri, C. E. P. (2010). Net greenhouse gas fluxes in Brazilian ethanol production systems. *GCB Bioenergy*, 2(1):37–44.
- García, C. A., Fuentes, A., Hennecke, A., Rieglhaupt, E., Manzini, F., and Masera, O. (2011). Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Applied Energy*, 88(6):2088–2097.
- García, C. A., García-Treviño, E. S., Aguilar-Rivera, N., and Armendáriz, C. (2016). Carbon footprint of sugar production in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 112:2632–2641.
- Gasser, T., Guivarch, C., Tachiiri, K., Jones, C.D., Ciais, P. (2015). Negative emissions physically needed to keep global warming below 2 °C. *Nature Communications* 6, 7958.
- Graefe, S., Dufour, D., Giraldo, A., Muñoz, L. A., Mora, P., Solís, H., Garcés, H., and Gonzalez, A. (2011). Energy and carbon footprints of ethanol production using banana and cooking banana discard: A case study from Costa Rica and Ecuador. *Biomass and Bioenergy*, 35(7):2640–2649.
- Groves, David G., James Syme, Edmundo Molina-Perez, Carlos Calvo, Luis Víctor-Gallardo, Guido Godínez-Zamora, Jairo Quirós-Tortós, et al. *Costos y beneficios de la descarbonización de la economía de Costa Rica: Evaluación del Plan Nacional de Descarbonización bajo incertidumbre*. BID, 2020.
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., and Meybeck, A. (2011). Global food losses and food waste. Extent, causes and prevention. Technical report, FAO.

- Hall, S. J., Delaporte, A., Phillips, M. J., Beveridge, M., and O'Keefe, M. (2011). *Blue frontiers: Managing the environmental costs of aquaculture*. Technical report, The WorldFish Center, Penang, Malaysia.
- Haverkort, A. J., Sandaña, P., and Kalazich, J. (2014). Yield gaps and ecological footprints of potato production systems in Chile. *Potato Research*, 57:13–31.
- Heck, V., Gerten, D., Lucht, W., Popp, A. (2018). Biomass-based negative emissions difficult to reconcile with planetary boundaries. *Nature Climate Change* 8, 151–155.
- Henders, S., Persson, U.M., Kastner, T., 2015. Trading forests: land-use change and carbon emissions embodied in production and exports of forest-risk commodities. *Environ. Res. Lett.* 10, 125012.
- Herrero, M., Havlík, P., Valin, H., Notenbaert, A., Rufino, M. C., Thornton, P. K., Blümmel, M., Weiss, F., Grace, D., and Obersteiner, M. (2013). Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Hong, C., Zhao, H., Qin, Y., Burney, J.A., Pongratz, J., Hartung, K., Liu, Y., Moore, F.C., Jackson, R.B., Zhang, Q. and Davis, S.J., 2022. Land-use emissions embodied in international trade. *Science*, 376(6593), pp.597-603.
- Huerta, A. R., Güereca, L. P., and de la Salud Rubio Lozano, M. (2016). Environmental impact of beef production in Mexico through life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 109:44–53.
- IDB, 2019. *Agriculture Sector Framework Document*. Inter-American Development Bank
- IDB, DDPLAC (2019). *Cómo llegar a cero emisiones netas: Lecciones de América Latina y el Caribe*. Inter-American Development Bank and Deep Decarbonization Pathways for Latin America and the Caribbean.
- IMF. “Greening the Recovery.” *Special Series on Fiscal Policies to Respond to COVID-19*. International Monetary Fund, 2020.
- IPCC (2018). Summary for Policymakers, in: *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*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ingwersen, W. W. (2012). Life cycle assessment of fresh pineapple from Costa Rica. *Journal of Cleaner Production*, 35:152–163.
- Knudsen, M. T., Fonseca de Almeida, G., Langer, V., Santiago de Abreu, L., and Halberg, N. (2011). Environmental assessment of organic juice imported to Denmark: a case study on oranges (*Citrus sinensis*) from Brazil. *Organic Agriculture*, 1:167.
- Lamb, W., T. Wiedmann, J. Pongratz, and Etc., 2021: A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters*.
- Landholm, D. M., Pradhan, P., Wegmann, P., Sánchez, M. A. R., Salazar, J. C. S., and Kropp, J. P. (2019). Reducing deforestation and improving livestock productivity: greenhouse gas mitigation potential of silvopastoral systems in Caquetá. *Environmental Research Letters*, 14(11):114007.
- Lapola, D. M., Schaldach, R., Alcamo, J., Bondeau, A., Koch, J., Koelking, C., and Priess, J. A. (2010). Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(8):3388–3393.
- Luo, Z., Wang, E., and Sun, O. J. (2010). Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? a meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(1):224–231.
- Maia, S. M. F., Carvalho, J. L. N., Cerri, C. E. P., Lal, R., Bernoux, M., Galdos, M. V., and Cerri, C. C. (2013). Contrasting approaches for estimating soil carbon changes in amazon

- and cerrado biomes. *Soil and Tillage Research*, 133:75–84.
- Mazzetto, A., Feigl, B., Schils, R., Cerri, C., and Cerri, C. (2015). Improved pasture and herd management to reduce greenhouse gas emissions from a Brazilian beef production system. *Livestock Science*, 175:101–112.
- Mondal, S., Chakraborty, D., Bandyopadhyay, K., Aggarwal, P., and Rana, D. S. (2020). A global analysis of the impact of zero-tillage on soil physical condition, organic carbon content, and plant root response. *Land Degradation & Development*, 31(5):557–567.
- Mora, O., Le Mouél, C., de Lattre-Gasquet, M., Donnars, C., Dumas, P., Réchauchère, O., Brunelle, T., Manceron, S., Marajo-Petizon, E., Moreau, C., Barzman, M., Forslund, A., and Marty, P. (2020). Exploring the future of land use and food security: A new set of global scenarios. *PLOS ONE*, 15(7):1–29.
- Mungkung, R., Phillips, M., Castine, S., Beveridge, M., Chaiyawannakarn, N., Nawapakpilai, S., and Waite, R. (2014). Exploratory analysis of resource demand and the environmental footprint of future aquaculture development using life cycle assessment. White Paper 2014-31, WorldFish, Penang, Malaysia.
- NTZ, 2022. Net Zero Tracker. <https://ze-rotracker.net/> Accessed February 2022
- Noponen, M. R., Edwards-Jones, G., Haggar, J. P., Soto, G., Attarzadeh, N., and Healey, J. R. (2012). Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 151:6–15.
- Ortiz-Rodríguez, O. O., Villamizar-Gallardo, R. A., Naranjo-Merino, C. A., García-Caceres, R. G., and Castañeda-galvis, M. T. (2016). Carbon footprint of the Colombian cocoa production. *Engenharia Agrícola*, 36(2).
- Pashaei Kamali, F., van der Linden, A., Meuwissen, M. P., Malafaia, G. C., Oude Lansink, A. G., and de Boer, I. J. (2016). Environmental and economic performance of beef farming systems with different feeding strategies in southern Brazil. *Agricultural Systems*, 146:70–79.
- Pendrill, F., Persson, U.M., Godar, J., Kastner, T., Moran, D., Schmidt, S., Wood, R., 2019. Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions. *Global Environmental Change* 56, 1–10.
- Pérez Neira, D. (2016). Energy sustainability of Ecuadorian cacao export and its contribution to climate change. a case study through product life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 112:2560–2568.
- Picasso, V. D., Modernel, P. D., Becoña, G., Salvo, L., Gutiérrez, L., and Astigarraga, L. (2014). Sustainability of meat production beyond carbon footprint: a synthesis of case studies from grazing systems in Uruguay. *Meat Science*, 98(3):346–354. doi:10.1016/j.meatsci.2014.07.005.
- Poepplau, C. and Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200:33–41.
- Poore, J. and Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392):987–992.
- Quiros-Tortos, Jairo, Godinez-Samora, Guido, Daniel De La Torre Ugarte, Carlos Heros, Juan Lazo Lazo, Elias Ruiz, Berioska Quispe, et al. “Costos y Beneficios de La Carbono-Neutralidad En El Perú: Una Evaluación Robusta.” Inter-American Development Bank and 2050 Pathways Platform, 2021.
- Raffa, D. W., Bogdanski, A., and Tittonell, P. (2015). How does crop residue removal affect soil organic carbon and yield? a hierarchical analysis of management and environmental factors. *Biomass and Bioenergy*, 81:345–355. doi:10.1016/j.biombioe.2015.07.022.
- Rahn, E., Läderach, P., Baca, M., Cressy, C., Schroth, G., Malin, D., van Rikxoort, H., and Shriver, J. (2014). Climate change adaptation, mitigation and livelihood benefits in coffee production: where are the synergies? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19:1119–1137.

- Saget, C., Vogt-Schilb, A., Luu, T. (2020). El empleo en un futuro de cero emisiones netas en América Latina y el Caribe. BID y OIT.
- Santos Da Silva, S. R., Miralles-Wilhelm, F., Muñoz-Castillo, R., Clarke, L. E., Braun, C. J., Delgado, A., Edmonds, J. A., Hejazi, M., Horing, J., Horowitz, R., Kyle, P., Link, R., Patel, P., Turner, S., and McJeon, H. C. (2019). The Paris pledges and the energy-water-land nexus in Latin America: Exploring implications of greenhouse gas emission reductions. *PLOS ONE*, 14(4):1–26. doi:10.1371/journal.pone.0215013.
- Schaldach, R., Göpel, J., and Klingler, M. (2017). The role of future land-use change in southern Amazonia to reach the aims of Brazil's national climate plan. *Erdkunde*, 71(3):213–230.
- Schroth, G., Jeusset, A., Gomes, A. d. S., Florence, C. T., Coelho, N. A. P., Faria, D., and Läderach, P. (2016). Climate friendliness of cocoa agroforests is compatible with productivity increase. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21:67–80.
- Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., and Dumas, P. (2019). Creating a sustainable food future. World resources report, World Resources Institute.
- Searchinger, T. D., Wiersenius, S., Beringer, T., and Dumas, P. (2018). Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature*, 564:249–253.
- Smith, P., Davis, S.J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., Kato, E., Jackson, R.B., Cowie, A., Kriegler, E., van Vuuren, D.P., Rogelj, J., Ciais, P., Milne, J., Canadell, J.G., McCollum, D., Peters, G., Andrew, R., Krey, V., Shrestha, G., Friedlingstein, P., Gasser, T., Grübler, A., Heidug, W.K., Jonas, M., Jones, C.D., Kraxner, F., Littleton, E., Lowe, J., Moreira, J.R., Nakicenovic, N., Obersteiner, M., Patwardhan, A., Rogner, M., Rubin, E., Sharifi, A., Torvanger, A., Yamagata, Y., Edmonds, J., Yongsung, C. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Clim. Change* 6, 42–50.
- Strassburg, B. B., Latawiec, A. E., Barioni, L. G., Nobre, C. A., da Silva, V. P., Valentim, J. F., Vianna, M., and Assad, E. D. (2014). When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Global Environmental Change*, 28:84–97.
- Subbarao, G. V., Sahrawat, K. L., Nakahara, K., Rao, I. M., Ishitani, M., Hash, C. T., Kishii, M., Bonnett, D. G., Berry, W. L., and Lata, J. C. (2012). A paradigm shift towards low-nitrifying production systems: the role of biological nitrification inhibition (BNI). *Annals of Botany*, 112(2):297–316.
- Svensson, Johannes, Henri Waisman, Adrien Vogt-Schilb, Chris Bataille, Pierre-Marie Aubert, Marcela Jaramilo-Gil, Jam Angulo-Paniagua, et al. “A Low GHG Development Pathway Design Framework for Agriculture, Forestry and Land Use.” *Energy Strategy Reviews* 37 (September 1, 2021): 100683.
- Turner, P.A., Field, C.B., Lobell, D.B., Sanchez, D.L., Mach, K.J. (2018). Unprecedented rates of land-use transformation in modelled climate change mitigation pathways. *Nature Sustainability* 1, 240–245.
- van Rikxoort, H., Schroth, G., Läderach, P., and Rodríguez-Sánchez, B. (2014). Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agronomy for Sustainable Development*, 34:887–897.
- Vogt-Schilb, Adrien. “Stronger Sustainable Growth.” In *Opportunities for Stronger and Sustainable Postpandemic Growth*, edited by Cavallo, Eduardo and Andrew Powell. Inter American Development Bank, 2021.
- Vosti, S., Msangi, S., Lima, E., Quiroga, R., Batka, M., and Zanocco, C. (2011). Agricultural greenhouse gas emissions in Latin America and the Caribbean. current situation, future trends and one policy experiment. Inter-American Development Bank Infrastructure and Environment Discussion Paper IDB-DP-167.

- Wirseniuss, S., Azar, C., and Berndes, G. (2010). How much land is needed for global food production under scenarios of dietary changes and livestock productivity increases in 2030? *Agricultural Systems*, 103(9):621–638.
- Yan, X., Akiyama, H., Yagi, K., and Akimoto, H. (2009). Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 intergovernmental panel on climate change guidelines. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2):GB2002.
- WRI, 2022. Climate Watch Historical Country Greenhouse Gas Emissions Data (1990-2018). World Resources Institute.
- World Bank. Inclusive Green Growth : The Pathway to Sustainable Development. Washington, D.C.: World Bank, 2012.
- WWF, 2020. Living Planet Report 2020 - Bending the curve of biodiversity loss. World Wide Fund, Gland, Switzerland.
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., and Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528:51–59.
- Zschornack, T., Bayer, C., Zanatta, J. A., Vieira, F. C. B., and Anghinoni, I. (2011). Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from flood-irrigated rice by no incorporation of winter crop residues into the soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(2).

Apéndice

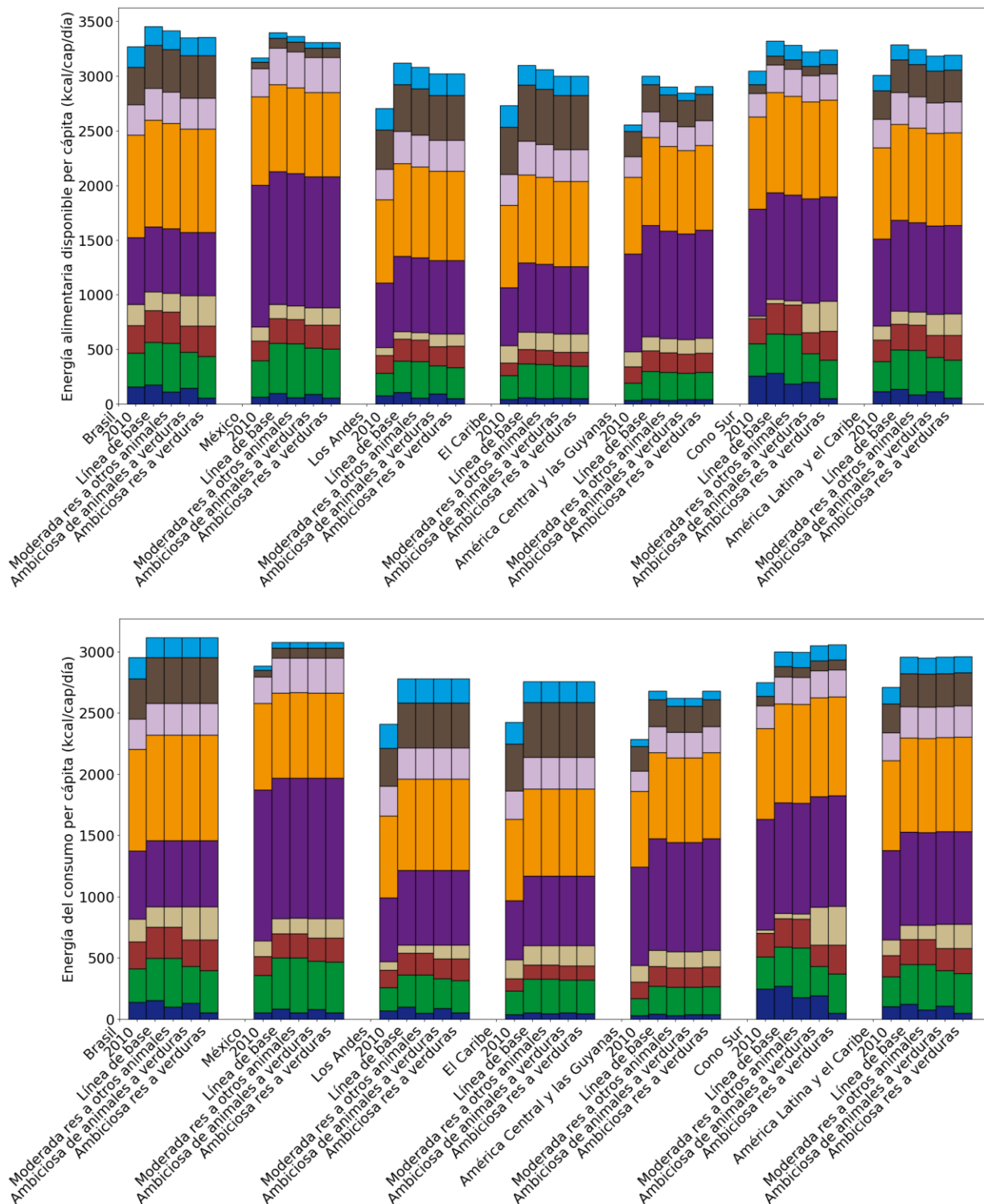


Gráfico 1 del Apéndice: Dietas por región y escenario, en energía disponible (arriba) y consumida (abajo)

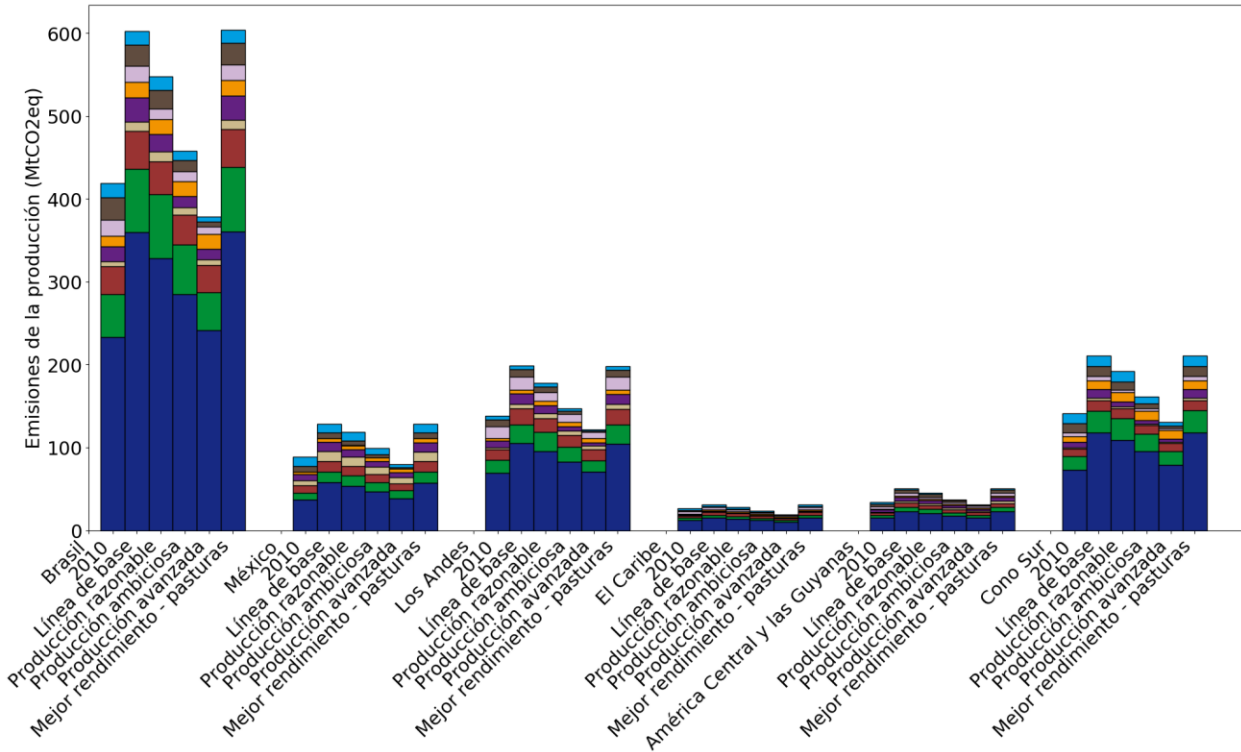


Gráfico 2 del Apéndice: Emisiones de la producción en los escenarios de la oferta, por subregiones

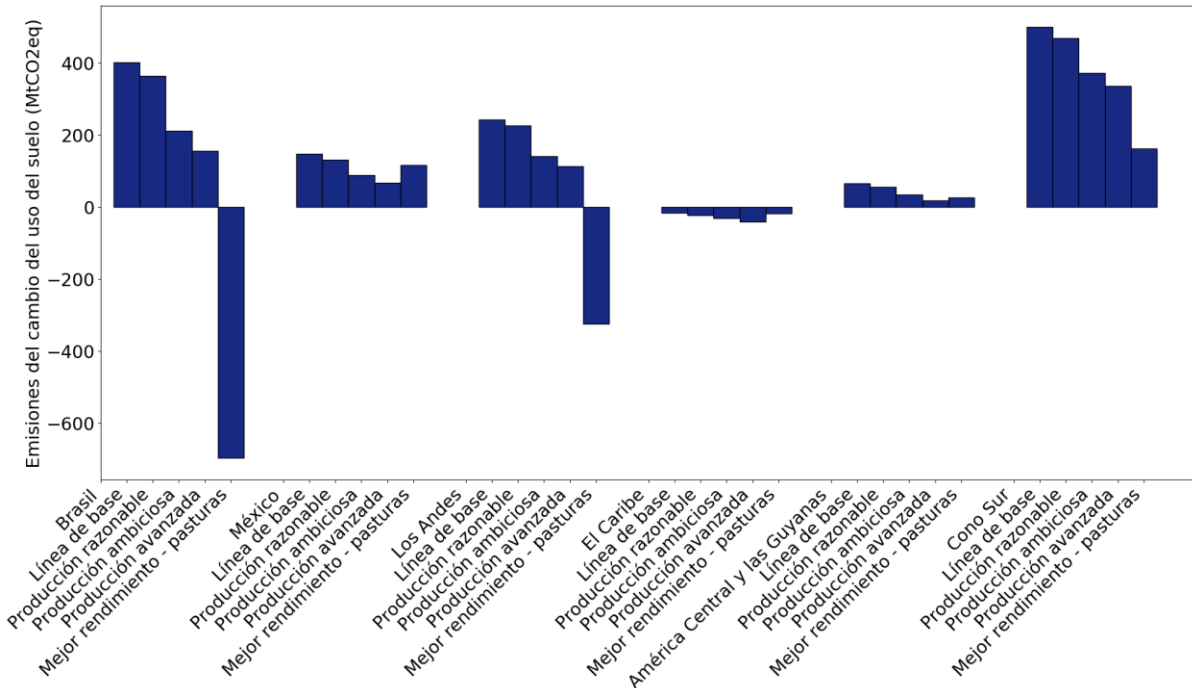


Gráfico 3 del Apéndice: Emisiones del cambio del uso del suelo en los escenarios de la oferta, por subregión

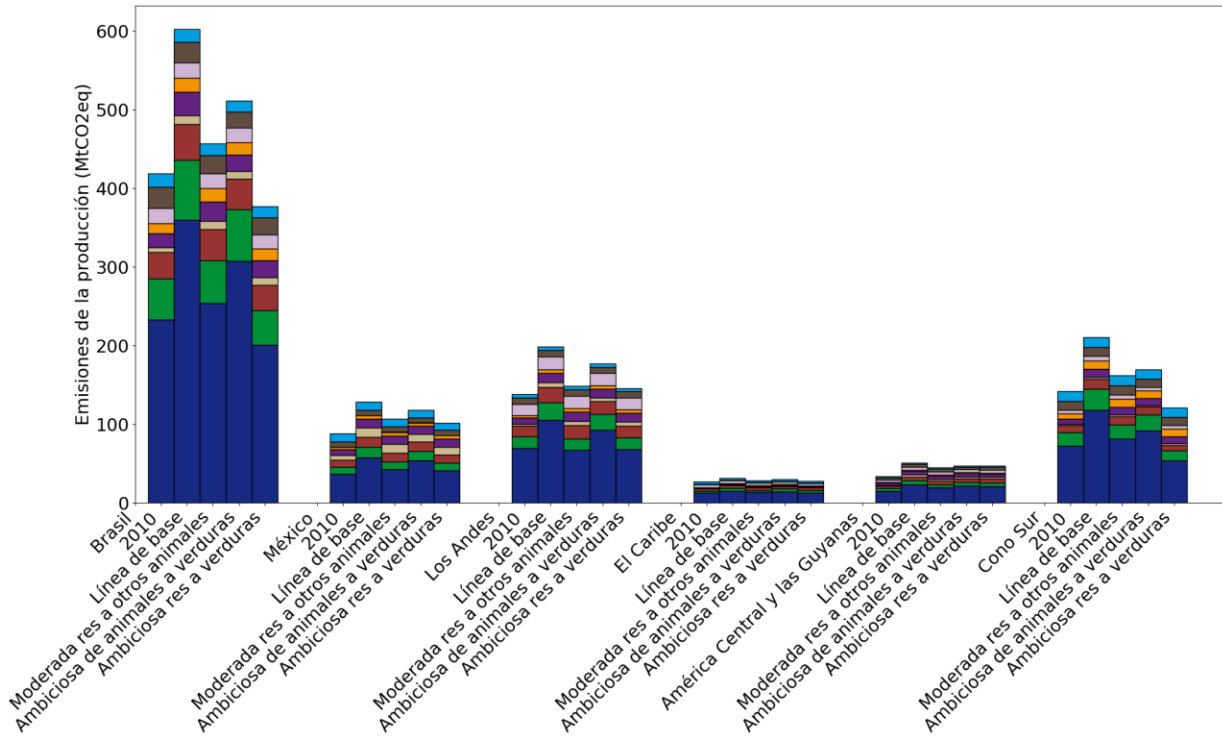


Gráfico 4 del Apéndice: Emisiones de producción por escenario de dieta, por subregión

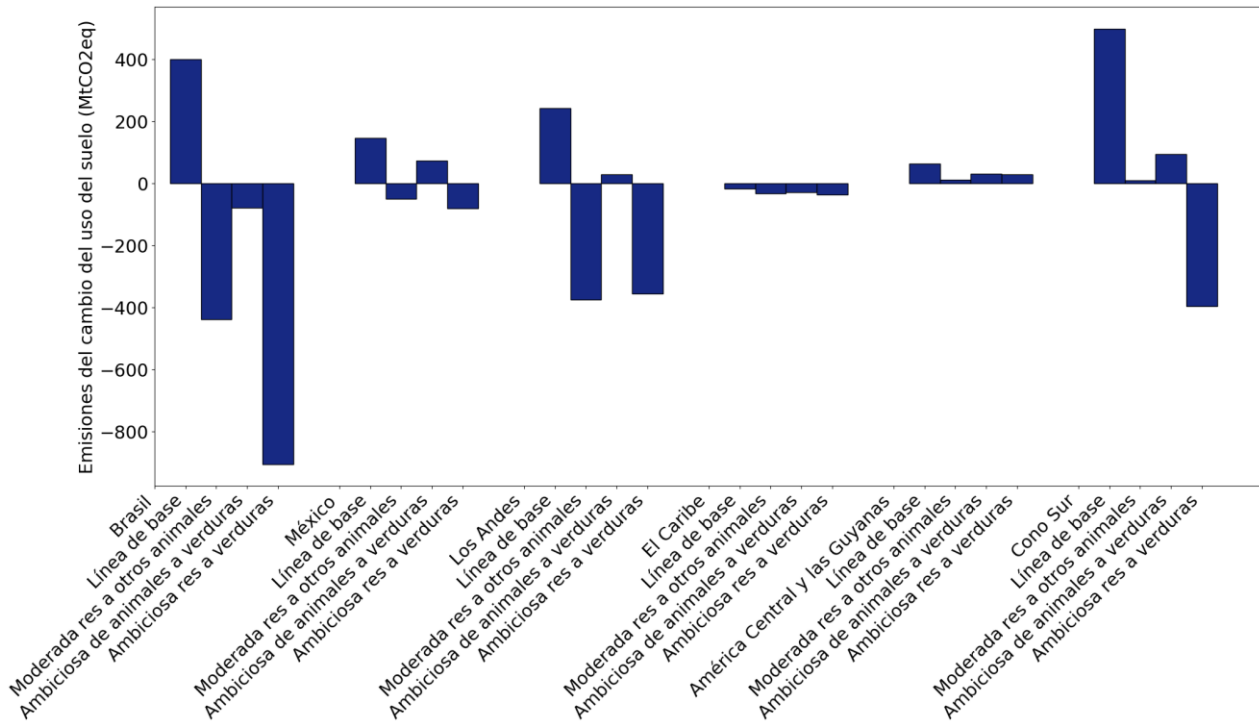


Gráfico 5 del Apéndice: Emisiones del cambio del uso del suelo por escenario de dieta por subregión

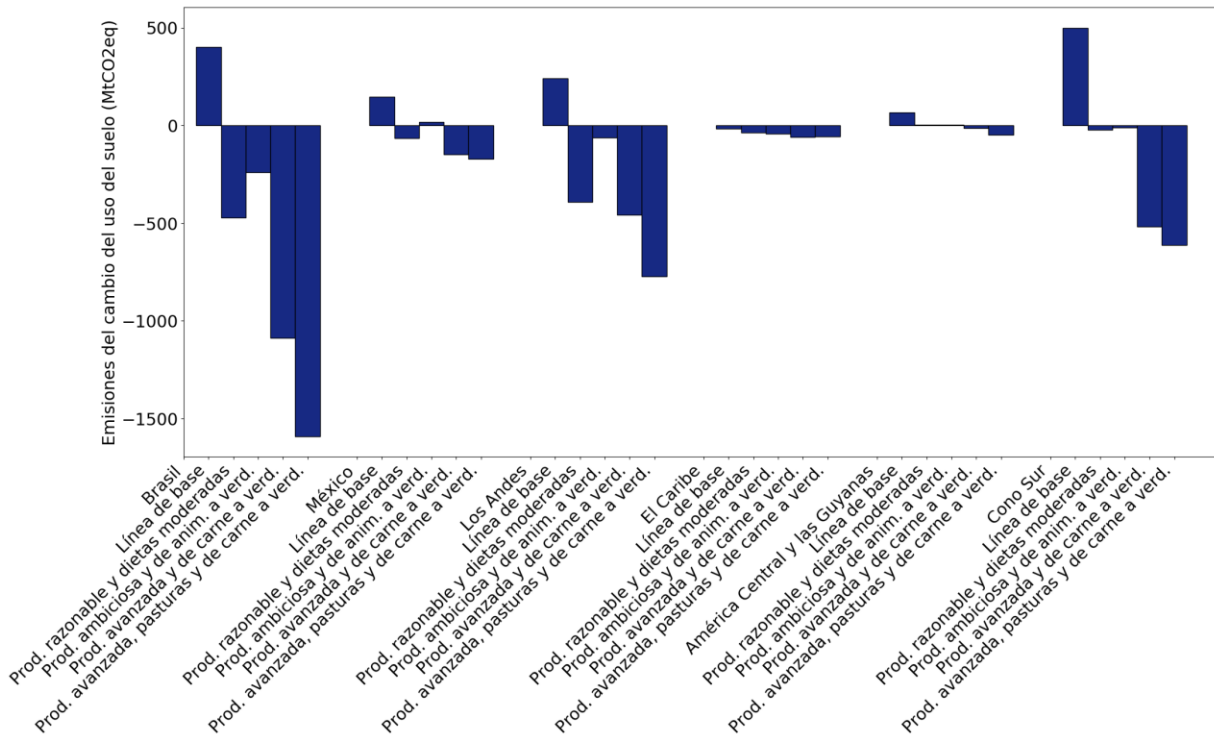


Gráfico 6 del Apéndice: Emisiones del cambio del uso del suelo, escenarios combinados de producción y dieta por subregión

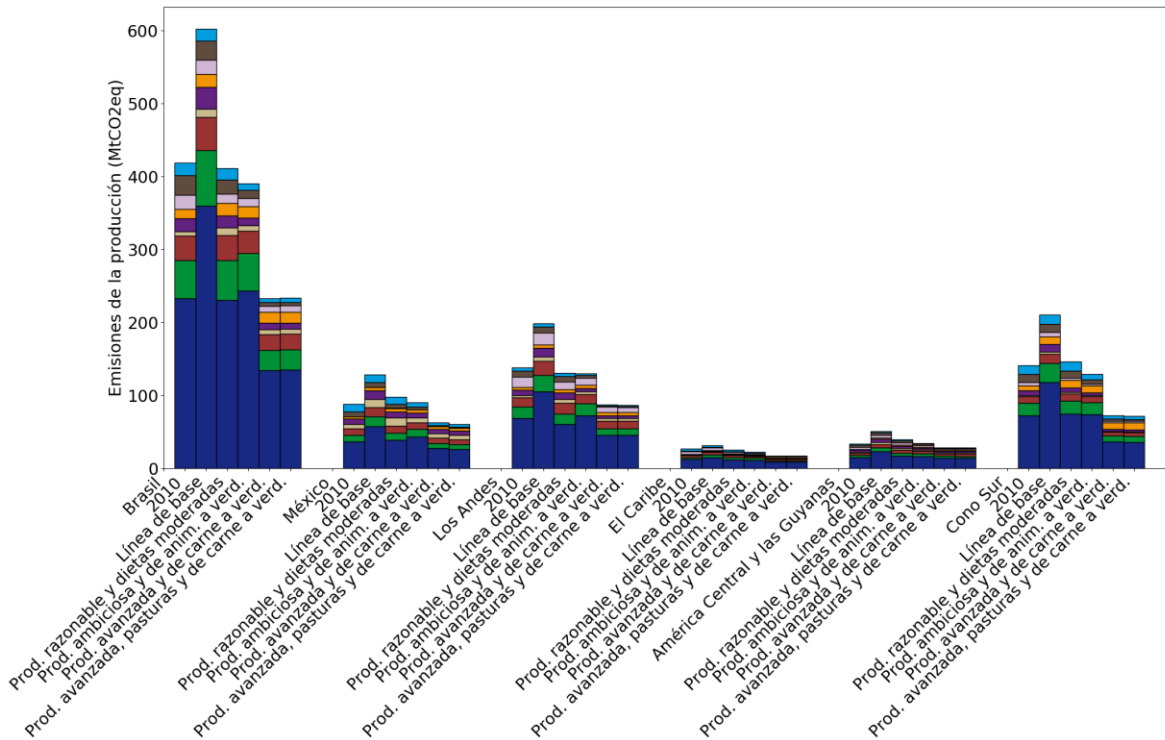


Gráfico 7 del Apéndice: Emisiones de producción, producción combinada y escenarios de dieta

Brasil	1,85
México	0,52
Los Andes	0,52
El Caribe	1,64
América Central y las Guyanas	1,21
Cono Sur	0,47
América Latina y el Caribe	0,95

Cuadro 1 del Apéndice: Rendimiento de las pasturas en el año de referencia (2010) en toneladas de materia seca/hectárea

	Carne de res (2010)	Carne de res (2050)	Lácteos (2010)	Lácteos (2050)
Brasil	38,5	30,7	2,63	1,92
México	28,1	22,8	0,88	0,81
Los Andes	37,2	29,8	2,87	2,07
El Caribe	65,7	50	3,18	2,27
América Central y las Guyanas	42,9	33,7	2,72	1,98
Cono Sur	27,5	22,8	1,04	0,9
América Latina y el Caribe	35,3	28,3	2,12	1,62

Cuadro 2 del Apéndice: Coeficiente de la necesidad de piensos, calculado como el ingreso total de materia seca de los piensos, dividido por la cantidad de producción del producto principal en toneladas de materia fresca (carne de res para la carne de res y leche cruda para los lácteos), en toneladas de materia seca/toneladas, en el año base y en las proyecciones de línea de base.