

CENTRO DE ESTUDIOS EN CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

El metano, la urgencia de reducir sus emisiones como un punto de apoyo clave para la mitigación

Serie:

Energía, Economía y Ambiente

Septiembre de 2025

Autores:

Hernán Carlino
Micaela Carlino

Nota:

Los puntos de vista expresados en esta nota de discusión son solo los de los autores y no necesariamente reflejan los de la Fundación y el Instituto Torcuato Di Tella en esta materia. Los textos que hacen parte de las distintas series difundidas por el Centro de Estudios en Cambio Climático Global tienen el propósito de suscitar una retroalimentación útil sobre asuntos y cuestiones de política ambiental, climática, y energética, a la vez que estimular el debate sobre unos desafíos de políticas que son cruciales en el contexto global y, especialmente, lo son en el ámbito nacional.

Estado de situación: Queda poco tiempo para actuar ¿Por qué?

La estabilización climática mediante la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero continúa siendo un proceso esquivo y sumamente problemático en el ámbito internacional. El aumento sin precedentes de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera ya ha provocado en el año 2024 un incremento de la temperatura media en la superficie del planeta de 1.55 °C ($\pm 0.13\text{ °C}$)¹, por encima de los niveles preindustriales (World Meteorological Organization, 2025),² poniendo nuevamente en evidencia de este modo la urgencia de la acción climática.

Debe notarse que si bien puede haber años que registren temperaturas medias globales que exceden 1.5 °C por encima del promedio 1850–1900, eso no significa que la meta de “proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a $1,5\text{ °C}$ con respecto a los niveles preindustriales”, como establece el Acuerdo de París, haya quedado ya fuera de nuestro alcance.³

En efecto, el IPCC define el cambio climático como un cambio en el estado del clima que persiste durante un período extendido, típicamente de décadas o incluso más. Según esta definición, haber alcanzado un calentamiento superior a 1.5 °C solo podría confirmarse una vez que la temperatura haya mantenido ese nivel durante un período de 20 años. Aun tomando un promedio sólo de 10 años, como hace el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6), así como también asumía el Primer Balance Global, esta excedencia requeriría un rezago de 5 años para poder confirmar ese nivel de aumento de la temperatura.

No obstante, con independencia de la metodología que se utilice para constatar y luego confirmar el aumento sostenido de la temperatura, cualquier incremento adicional del calentamiento global que se produzca conduce a cambios en los extremos climáticos y a un acrecentamiento de los riesgos, a la vez que se agravan los impactos actuales y se intensifican los efectos esperados.

Aislados o combinados, estos impactos (entre otros, inundaciones, tormentas y lluvias extremas, marejadas, olas de calor, sequías severas y prolongadas, incendios forestales salvajes y ciclones tropicales, que se producen en distintas regiones del planeta, incluso a veces en distintas zonas en una misma región), socavan la resiliencia de las sociedades, así como se acentúa la disrupción de los ecosistemas. Por añadidura, aumentan los riesgos, especialmente para los grupos más vulnerables, acrecentándose la inseguridad, especialmente la alimentaria, y el riesgo de enfermedades vinculadas a los estragos provocados por el calentamiento global.

¹ El indicador clave definido por la WMO para mensurar ese incremento es la temperatura promedio global cercana a la superficie de la tierra, por encima del promedio 1850–1900 que se utiliza para representar las condiciones pre-industriales.

² WMO (2025). WMO Confirms 2024 as Warmest Year on Record at about 1.55 °C above Pre-industrial Level. World Meteorological Organization news media centre.

³ Naciones Unidas (2015). Acuerdo de París. Artículo 2.1 a). Página 3.

Así, los extremos climáticos provocan -directa o indirectamente- el deterioro y/o la destrucción de viviendas, de infraestructura crítica, de asentamientos humanos, la degradación y pérdida de los bosques, de tierras agrícolas, y de ecosistemas, a la vez que amenazan la biodiversidad y provocan el desplazamiento de un número significativo de personas que habitan en zonas ambientalmente frágiles o afectadas por conflictos.

Comprender la importancia de reducir las emisiones de metano

Frente a ese panorama crecientemente adverso para la humanidad y la naturaleza -emisiones en aumento e impactos devastadores- la mitigación del cambio climático se hace tan imprescindible como urgente. **En estas condiciones, la reducción de emisiones de metano (CH₄) de origen antropogénico puede desempeñar un papel clave en esa tarea.**

En efecto, el metano es un potente gas de efecto invernadero (GEI), si bien de vida corta en la atmósfera. Hay dos características principales que determinan el impacto que producen los diferentes gases de efecto invernadero sobre el sistema climático: el tiempo que permanecen en la atmósfera y su capacidad de absorber energía.

El metano tiene un tiempo de permanencia en la atmósfera mucho más corto que el dióxido de carbono (CO₂) - de entre 9 y 12 años (IPCC, 2021), en comparación con siglos-, pero mientras permanece en la atmósfera absorbe mucha más energía.

Por unidad de masa, el metano tiene un poder de calentamiento global que es, aproximadamente, unas 80 veces más potente que el CO₂, medido en un plazo de 20 años. Más específicamente, cuando se considera el impacto del metano en un horizonte de 20 años, utilizando para ello como medida el poder de calentamiento global (GWP-20), una tonelada de metano emitido por fuentes fósiles es, según el IPCC equivalente a 82,5 toneladas de CO₂. En el horizonte de 100 años (GWP-100), una tonelada de metano emitido por fuentes fósiles es equivalente a 29,8 toneladas de CO₂ (Forster et al., 2021). En el caso de las fuentes microbianas, la equivalencia es 79,7 y 27,8 respectivamente, según Englund Michel et al., 2024.⁴ El IPCC, en cambio, sugiere un poder de calentamiento global (GWP), para lo que define como CH₄ - no fósil, para el que indica un GWP-20 de 80,8 y un GWP-100 de 27,2 (Forster et al., 2021), ligeramente distinta de la estimación anterior.

Esto significa que los cambios en la concentración atmosférica de CH₄ pueden tener un efecto significativo sobre la ocurrencia temporal y la magnitud de los máximos de temperatura que puedan generarse en el corto y mediano plazo, así como en la evolución de las tendencias hacia mediados de este siglo.

El metano es también un precursor en la formación de ozono troposférico -a nivel de la superficie de la tierra-, un contaminante aéreo peligroso que puede impactar negativamente sobre la salud, pues en particular es responsable a escala global de la muerte de alrededor de un millón de personas debido a enfermedades respiratorias cada año. El ozono troposférico también produce efectos desfavorables sobre los rendimientos de los cultivos.

Así se ha demostrado el vínculo del metano con la contaminación atmosférica, teniendo en cuenta su condición de precursor del ozono troposférico, por lo que es importante mencionar

⁴ Se suelen distinguir fuentes de emisiones microbianas de CH₄ (ganadería, rellenos sanitarios, humedales); de emisiones pirogénicas de CH₄ (quema de biocombustibles y de biomasa) y de emisiones de combustibles fósiles de CH₄; las emisiones de las diversas fuentes se distinguen por el componente isotópico del metano atmosférico.

que adicionalmente al beneficio primario que resulta de la reducción del incremento de la temperatura global, una mitigación significativa de las emisiones de metano trae consigo otros beneficios asociados.

Entre otros, los beneficios de la mitigación comprenden la posibilidad de evitar, por ejemplo, enfermedades respiratorias y cardiovasculares, la reducción de pérdidas esperadas de horas de trabajo por la exposición a altas temperaturas ambientales, a la vez que la posibilidad de prevenir la disminución de los rendimientos de cultivos tales como trigo, maíz, soja y arroz.

Debido a su relativamente corta permanencia en la atmósfera, el metano ha sido incluido dentro del grupo de los denominados contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), junto con el carbono negro, el óxido nitroso y compuestos como los hidrofluorocarburos (HFC)⁵.

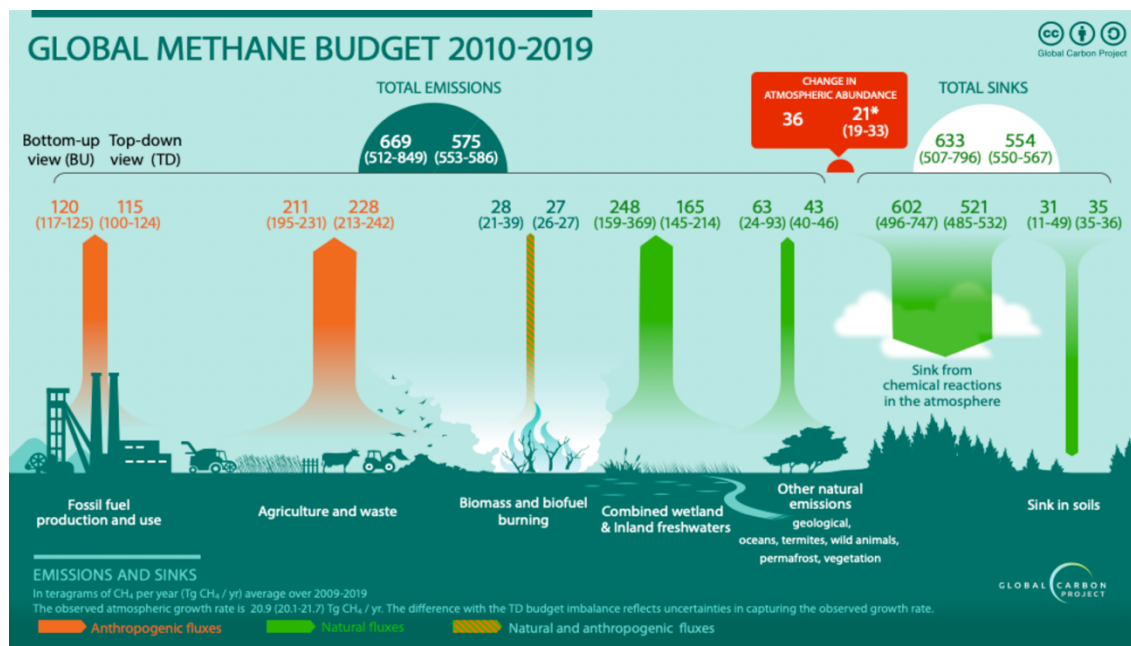
El crecimiento de las emisiones de metano da cuenta del 0.5°C de calentamiento global desde fines del siglo XIX. Ese incremento sostenido en las emisiones fue consistente con el aumento de aquellas originadas en la producción y el uso de las energías fósiles. Así, la concentración atmosférica de metano se ha casi triplicado desde el período pre-industrial (Liu, G. et al., 2025; Rubino et al. 2019).

A principios de los 2000 se observa asimismo un crecimiento de la participación de las fuentes biogénicas, entre ellas de la ganadería y de la gestión de los residuos, acompañado de un aumento de las emisiones de los sistemas naturales -entre otros los humedales- que se expandieron a una tasa en torno del 4% anual, entre el 2000 y el 2010 (Z. Zhang et al., 2023).

En la Figura 1, a continuación, se presentan las principales fuentes y sumideros de metano y los flujos naturales y antropogénicos.

⁵ Los hidrofluorocarburos o hidrofluorocarbonos (HFC) son compuestos organofluorados comunes. Los HFCs son compuestos de síntesis industrial, por lo que no es habitual encontrar fuentes naturales de emisión de estos gases.

Figura 1: Presupuesto global de metano 2010-2019. Fuentes y sumideros



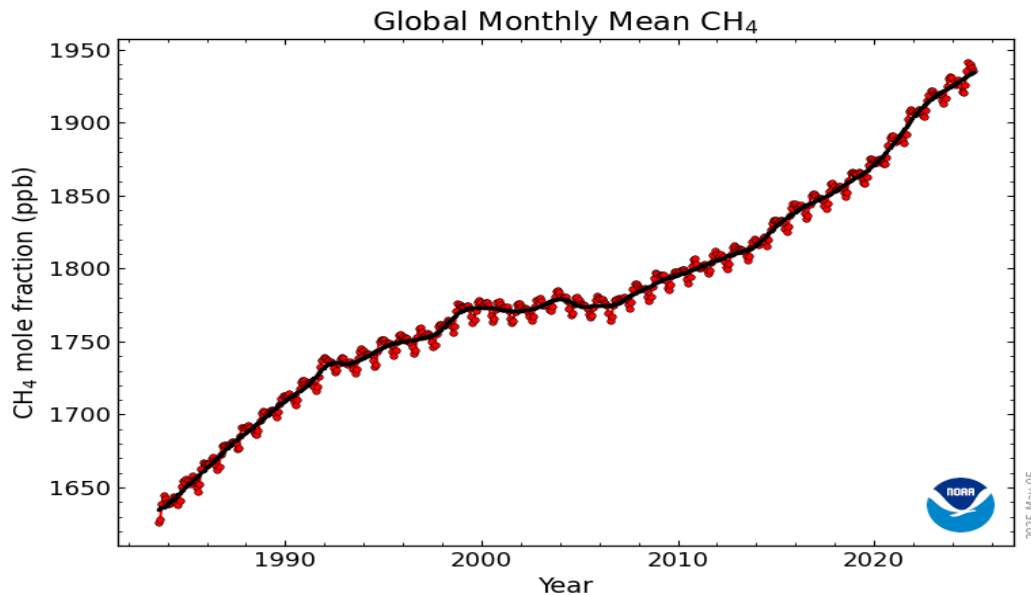
Fuente: *The Global Methane Budget 2000-2020 (2024)*.⁶

Entre el 2010 y el 2019, las fuentes antropogénicas de metano daban cuenta en promedio de entre el 63% al 68% de las emisiones totales de metano (Sauniois et al., 2024), aunque haya algunas incertidumbres remanentes respecto de esa atribución que están vinculadas a la heterogeneidad de las diversas fuentes y de las distintas regiones y también a las fluctuaciones que ocurren en las emisiones de las fuentes naturales.

En conjunto, los niveles de metano han aumentado más significativamente desde el 2006, impulsados primariamente por las actividades humanas, mientras las fuentes naturales son altamente variables, por lo que modifican las tendencias mayormente en el corto plazo (Skeie et al., 2023). No obstante, algunas investigaciones revelan que las emisiones de fuentes naturales, especialmente las emisiones que provienen de los humedales, son sensibles a un clima más cálido y húmedo, por lo que podrían actuar como un mecanismo de retroalimentación positiva en el futuro (Peng, S., Lin, X., Thompson R.L. et al. (2022).

⁶ Acceso en: <https://www.globalcarbonproject.org/methanebudget/index>

Figura 2: Promedio global mensual de la abundancia de metano atmosférico determinado de superficies marinas⁷



Fuente: NOAA Global Monitoring Division of NOAA's Earth System Research Laboratory

En 2022 la fracción de mol del metano atmosférico alcanzó un nivel de 1912 partículas por billón (Lan et al., 2024), un nivel algo más de 2,6 veces más elevado que el que se registraba en el periodo pre-industrial.

Es de destacar que la tendencia al crecimiento de las emisiones de metano, y luego a su concentración, se ha acelerado incluso en los últimos cinco años (Saunio et al., 2025, Jackson et al., 2024), cuando los niveles de metano en la atmósfera han acrecido a tasas sin precedentes. Los datos más recientes, asimismo, indican que también hubo un significativo incremento en el 2023.

Pese a la gravitación del metano en el conjunto de las emisiones globales, ya que ese gas es responsable de aproximadamente casi la mitad del calentamiento global neto habido hasta la fecha, además de considerar sus tendencias recientes de crecimiento, en alguna medida, el abatimiento de las emisiones de metano ha sido desatendido con respecto al foco en las emisiones del dióxido de carbono.

En efecto, se estima que solo alrededor del 2% de los flujos totales de financiamiento climático ha sido destinado a la reducción de emisiones de metano (Narane, P. et al., 2022). En el mismo sentido, solo aproximadamente el 13% de las emisiones globales de metano estaban cubiertas por mecanismos de política creados específicamente con el fin de reducir esas emisiones (Olczak, M. et al., 2023). Aunque esas condiciones se hayan ido revirtiendo paulatinamente en años recientes.

⁷ Este gráfico presenta la entera serie temporal de NOAA que comienza en 1983.

El rezago en llevar adelante esfuerzos de mitigación del metano ha ocurrido pese a que en el caso de este gas numerosos costos de mitigación son relativamente reducidos respecto de los costos financieros y de inversión para implementar las reducciones propuestas y, asimismo, son muy bajos por comparación con las estimaciones de los daños ocasionado por las emisiones, esto es de los costos sociales del metano.

En efecto, según algunas estimaciones el costo social del metano al 2030 habrá de variar entre USD1100 y USD2300 (EPA, 2023).⁸ Se observa, además, que el costo social del metano hacia el 2030 es entre 8 y 15 veces mayor que el costo social del dióxido de carbono, habiendo sido calculado ambos utilizando los referidos modelos de estimación de daños (Climate Impact Lab, 2022; Rennert, K. et al, 2022; Howard y Sterner, 2017).

Hay algunas actividades, sectores económicos y regiones geográficas que tienen una responsabilidad considerable en las emisiones, así como en los cambios ocurridos en las emisiones desde el año 2000.

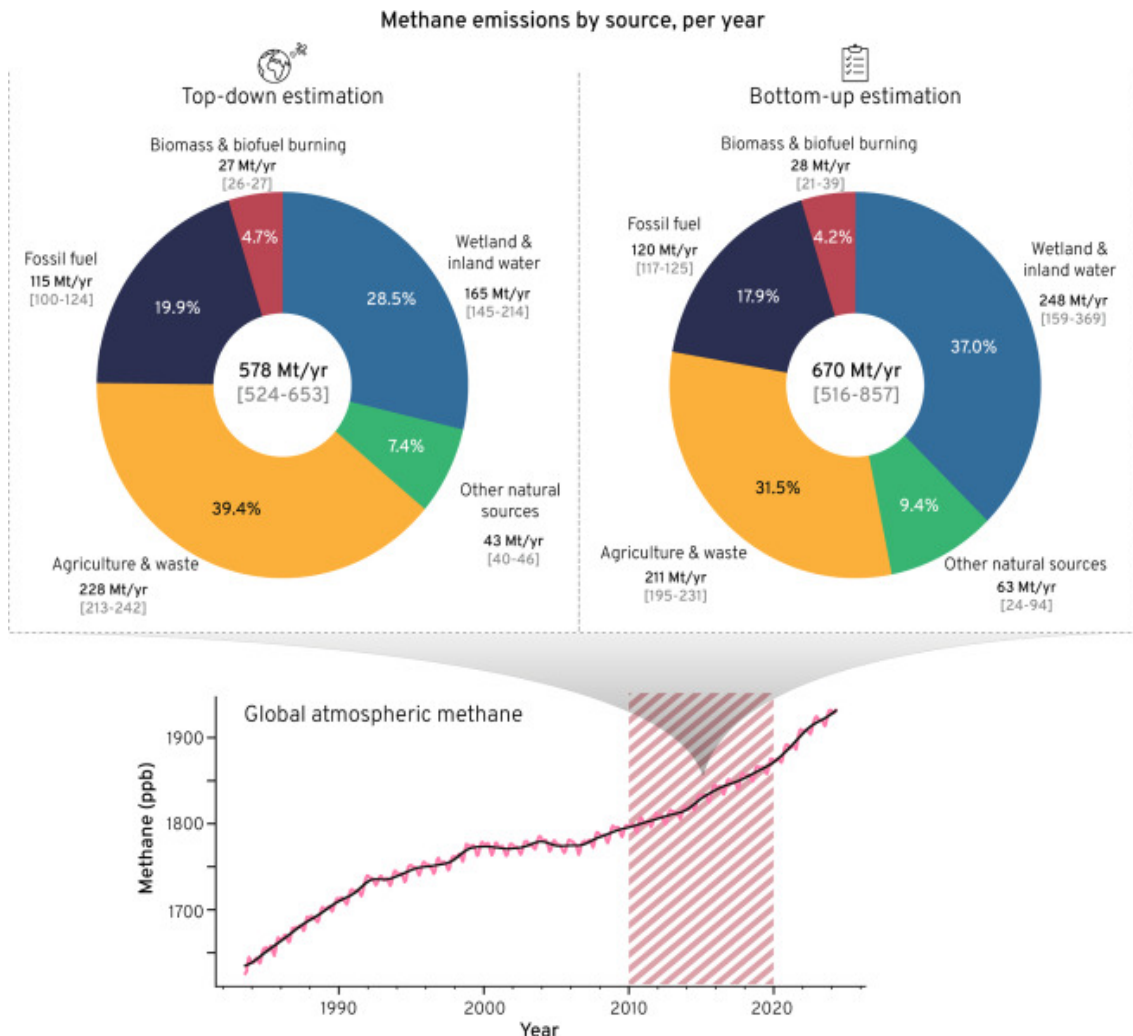
Debe tenerse en cuenta que el metano es emitido por unos procesos y actividades que son diferentes a los que generan el CO₂.

En efecto, el CO₂ proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) para la generación de energía y el transporte, de los procesos industriales (producción de cemento, hierro y acero, y de sustancias químicas, etc.), y de la agricultura, la deforestación y otros cambios en el uso de la tierra.

El CH₄ de origen antropogénico se emite principalmente en tres sectores: extracción y uso de combustibles fósiles, agricultura y ganadería y manejo de residuos (Ver la participación de cada sector en la Figura 3 a continuación, que incluye además las emisiones de metano de fuentes naturales).

⁸ Calculado utilizando una tasa de descuento del 2,5% y estimado a partir de tres modelos de estimación de daños que incluyen exclusivamente los impactos del cambio climático.

Figura 3: Emisiones de metano por fuente (promedio para el periodo 2010-2019)



Fuente: Schaeffer et al. (2025), (adaptado de Saumois et al., 2024)

Más específicamente, para cada fuente hay diversas actividades y distintos procesos que generan emisiones de metano. Entre esas fuentes se distinguen:

- i. El **sector agrícola y ganadero** estimativamente genera entre el 40% y el 50% del metano antropogénico. Como la demanda global de alimentos está en crecimiento, se proyecta que las emisiones provenientes de esta fuente muy posiblemente habrán de aumentar.

Las emisiones en este sector se producen debido en buena medida a los procesos de fermentación entérica en los rumiantes (primariamente bovinos y ovinos), que ocurren cuando se descompone la materia orgánica en el rumen de los animales; esta fuente de emisiones representa alrededor de un 73% de las emisiones totales de este sector.

También deben tomarse en cuenta las emisiones que se producen como consecuencia de la descomposición por microorganismos del estiércol acumulado, cuya gestión influye en las emisiones de metano (7%).

Además, en este sector, se generan emisiones a partir de la quema de biomasa típicamente para la expansión de las tierras de pastoreo y de cultivos, si bien en una proporción menor.

El cultivo de arroz es, asimismo, una fuente significativa a escala global (20%), ya que la producción en condiciones anaeróbicas en superficies inundadas favorece la metanogénesis.⁹

- ii. El **sector de producción, transporte y distribución de combustibles fósiles** da cuenta de entre el 20% y el 30% de las emisiones globales que corresponden principalmente al denominado metano fugitivo.

La producción y uso de combustibles fósiles resultaba en cerca de 120 millones de toneladas métricas de emisiones de metano en 2023, a lo que deben agregarse otros 10 millones de toneladas mayormente provenientes de los usos tradicionales de la biomasa.

Las principales fuentes por las que se producen emisiones de metano en el *upstream* de la producción de petróleo y gas son:

- i. Liberación directa de metano, deliberadamente vía el venteo, o, involuntariamente a través de las emisiones fugitivas;
- ii. mediante procesos de combustión incompleta en las antorchas (*flaring*)

Estas emisiones resultan de la secuencia de procesos que se llevan a cabo durante la extracción de petróleo y gas, pero también se generan emisiones en las fases de refinación, transmisión y distribución, especialmente debido a fugas en los ductos y en la operación de los equipos.

Hay asimismo emisiones de CO₂ originadas en la combustión para producir electricidad, calor y en los equipos de perforación y otras maquinarias; también hay emisiones de CO₂ al destruir metano en las antorchas y venteo directo del CO₂ presente en los gases recuperados.

En lo que concierne a la quema en antorchas (*flaring*), que da cuenta de alrededor del 10% de las emisiones totales de metano en el sector de *oil & gas*, esta tecnología es ampliamente usada por la industria para disponer del gas natural. La industria y los gobiernos asumen que las antorchas permanecen continuamente encendidas y que destruyen el metano mediante su combustión con una eficiencia del 98%, un valor que está basado en un número limitado de estudios, que incluyen los realizados por

⁹ United Nations Environmental Program y Climate and Clean Air Coalition (2022).

la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en la década de los ochenta (McDaniel, 1983), y otras investigaciones (Pohl et al. 1986). Ninguno de ambos supuestos está basado en observaciones reales.

Así, como ejemplo de esas discrepancias entre supuestos respecto de la eficiencia de la tecnología y las mediciones a campo, un muestreo aéreo realizado para medir la eficiencia del *flaring* en las tres principales regiones productoras de gas de los Estados Unidos, que es un país que se ubica consistentemente entre los 5 mayores emisores de metano en el sector de petróleo y gas, ha hallado que las emisiones de metano son allí cinco veces más elevadas que lo que se pensaba (Plant et al., 2022).

Otra fuente de emisiones en la industria es la que resulta de las fugas de plantas y equipos obsoletos o abandonados. Las empresas con frecuencia prefieren invertir en nuevas instalaciones y en expandir la producción, que en reparar o desmontar el equipamiento y las facilidades que están cerca del fin de su vida útil económica.

A las emisiones correspondiente a las actividades vinculadas al petróleo y el gas, deben añadirse las emisiones provenientes de la minería del carbón, que suman entre el 10% y el 15% del total del metano antropogénico (De Fabrizio et al., 2021).

Corresponde destacar, asimismo que, según la International Energy Agency (IEA), esta categoría de emisiones de metano -relacionadas con la energía- no ha alcanzado aún su máximo, mientras otra tendencia que constituye un factor adicional de preocupación es que las emisiones de metano están considerablemente subestimadas en los inventarios nacionales, pues se realizan casi sin el contraste con mediciones a campo en una mayoría de los casos (IEA, 2025).

En este sentido, la misma IEA ha estimado que las emisiones de metano de la industria han alcanzado un nuevo máximo en 2019 y se han estabilizado en ese nivel desde entonces. Asimismo, el cálculo de esa Agencia es que las emisiones globales de metano del sector de la energía son un 70% más elevadas que lo que los propios países reportan (IEA, 2024).

- iii. El **sector de residuos**, otra de las principales fuentes de emisiones, libera metano por la descomposición de los residuos sólidos orgánicos, así como de la materia orgánica presente en las aguas residuales, principalmente de origen doméstico.

Este sector da cuenta de aproximadamente una de cada cinco toneladas de metano emitidas cada año, si bien se asume que esas emisiones pueden ser incluso considerablemente mayores que lo que indican los inventarios de emisiones que habitualmente se elaboran para esta fuente.

Los residuos sólidos generan (estimativamente) entre el 7% y el 10% del metano antropogénico. A su vez, las aguas residuales dan cuenta de unos porcentajes similares a los residuos sólidos y, en conjunto, suman entonces hasta un 20% del total de las toneladas de metano antropogénico emitidas cada año (De Fabrizio et al., 2021).

Los residuos de alimentos y los residuos verdes comprenden más del 50% de los residuos en los países de ingresos bajos y medios. Las emisiones del tratamiento y disposición de residuos sólidos, mayormente impulsadas por su disposición en vertederos a cielo abierto y la utilización de rellenos sanitarios sin sistemas de recolección del gas generado en esos sitios, dan cuenta de alrededor del 5% de las emisiones totales de GEI (Banco Mundial, 2018; Hausfather, 2017).

Las emisiones de otros GEI que también pueden producir estas actividades resultan de una inadecuada recolección de residuos, de la disposición sin controles y de la quema de residuos.

Las oportunidades para la acción de mitigación mediante la mejora de la eficiencia

Como la permanencia del metano en la atmósfera es inferior a una década, las emisiones son destruidas naturalmente en unos pocos años. Por eso, en general, la mejor manera para reducir la concentración atmosférica de metano es, directamente, evitar sus emisiones. Además, se ha demostrado que hay una retroalimentación positiva entre calentamiento global y emisiones de metano de fuentes naturales, pues estas crecen a medida que aumenta la temperatura global, por ejemplo, en el caso de los humedales y del derretimiento de los suelos de congelación permanente (*permafrost*).

Para que el conjunto de los países se mueva en un sendero consistente con la meta de 1.5° C, establecida en el Acuerdo de París, las emisiones de metano deben ser reducidas en un 45% al 2030, si se lo mide en relación con los niveles de emisiones proyectados para ese año, y en aproximadamente entre el 35% al 40%, si es en relación a las emisiones actuales (CCAC, 2021).

Un aspecto positivo con referencia a ese esfuerzo de mitigación imprescindible es que numerosos estudios disponibles demuestran que **lograr una reducción de las emisiones globales de metano del 30% para el 2030 es técnica y económicamente factible**.

Como en otros ámbitos en los que se desenvuelven las acciones de mitigación (otros gases, diferentes sectores, distintas regiones y países), las mayores barreras al logro de ese objetivo están vinculadas esencialmente a cuestiones institucionales y de políticas.

En el caso del metano, solo aproximadamente el 13% de las emisiones de metano antropogénico están cubiertas por políticas de mitigación, e incluso la efectividad de esas políticas es por lo menos poco clara, con lo cual es preciso poner en vigor acciones rápidas, robustas y persistentes para revertir la tendencia en el crecimiento de las emisiones (Olczak et al., 2023). En el mismo sentido, el Sexto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) afirma que **el metano está sub-regulado en el mundo**.

Si bien hay diferencias considerables en lo que concierne al potencial de mitigación de metano entre las principales fuentes de emisión en los diferentes sectores, así como entre las distintas regionales del mundo, se estima que la implementación plena de las medidas y opciones técnicas disponibles permitirían una reducción de las emisiones proyectadas al 2030 casi a la mitad, al tiempo que alrededor de una cuarta parte de esa reducción podría materializarse con un costo neto igual a cero. No obstante, es preciso recordar que las emisiones de metano provienen de fuentes diversas y también difusas, lo que crea dificultades para llevar a la práctica la implementación de esas medidas de mitigación.

Se observa que el mayor potencial técnico de mitigación del metano antropogénico se encuentra en el sector de la producción y el uso de combustibles fósiles, así como en el de gestión de residuos, mientras que ese potencial técnico es relativamente menor en el caso de las fuentes de emisiones de metano provenientes de la agricultura.¹⁰

¹⁰ Se aclara que bajo el concepto de agricultura se engloba, siguiendo la denominación en inglés, las actividades agrícolas y ganaderas. En relación con el metano, las emisiones de la agricultura (así expresada en una porción sustantiva de los análisis sobre esta materia que se elaboran mayoritariamente en inglés) provienen primariamente de las fuentes de emisiones microbianas originadas en la ganadería.

Los actores privados -empresas, desarrolladores de proyectos, inversores, instituciones financieras- tienen por cierto un rol decisivo en los esfuerzos para disminuir las emisiones de metano, papel que podrían asumir a partir de la comprensión e internalización de sus múltiples beneficios económicos, a los que se añaden los otros beneficios ambientales y sociales concomitantes.

Según un reporte de McKinsey Sustainability introducir medidas de abatimiento de emisiones en cinco industrias: agricultura, petróleo y gas, minería del carbón, manejo de los residuos sólidos y gestión de las aguas residuales, -sectores que representan en conjunto casi el 98% de las emisiones antropogénicas de metano- podría provocar un impacto significativo, disminuyendo considerablemente las emisiones provenientes de esas fuentes (DeFabrizio et al., 2021).

Puede mencionarse, asimismo, que la remoción directa de metano (in situ) está empezando a ser considerada potencialmente como una de las opciones técnicas que podrían incluirse en el portafolio de estrategias para gestionar el metano, para lo cual se vienen explorando diferentes abordajes para comprender mejor sus posibilidades e identificar sus potenciales impactos adversos para hacer posible luego implementar en la práctica esa remoción.

Es de notar, entonces, que hay distintos desafíos asociados con el desarrollo y la aplicación de estas tecnologías emergentes, si se tiene en cuenta que la exploración de los métodos para la remoción de metano, o su oxidación a dióxido de carbono, solo ha comenzado muy incipientemente y demandaría la ejecución de programas de investigación a mediano plazo para determinar con certeza su viabilidad y aceptabilidad social (Gorham et al. 2024).

A continuación, se examinan por separado las opciones para la mitigación del metano en aquellos sectores que constituyen las principales fuentes de emisiones y se hacen algunas consideraciones respecto a su conveniencia y factibilidad.

Opciones de mitigación

Combustibles fósiles

En la producción de combustibles fósiles se identifican distintas medidas entre las cuales se cuentan las siguientes:

- reducir la combustión incompleta en las antorchas (*flare*), mediante la mejora de la eficiencia de la quema en esas antorchas que evita emitir metano y convierte ese gas en dióxido de carbono,
- hacer más eficiente el venteo, que se realiza por razones de seguridad o en emergencias,
- evitar las emisiones fugitivas de metano de la producción, procesamiento y distribución de petróleo y gas, especialmente en los ductos y en los equipos
- reducir las emisiones de la minería del carbón (por ejemplo, captura, recuperación y utilización del metano de las minas de carbón [CMM, por sus siglas en inglés]).

Según uno de los especialistas en *flaring*, la firma Capterio, casi un 7% del gas producido se pierde a través del venteo, el *flaring* y las fugas en los sistemas. Evitar esas pérdidas se puede lograr mediante sistemas de recuperación del gas de antorcha, la mejora de la eficiencia en la combustión y al reducir el consumo de gas para vapor, gas de purga y el gas piloto.

También se puede contemplar en este conjunto una medida, que puede entenderse más bien como una estrategia, que implica aumentar la ambición en la mitigación y está en línea con los pronunciamientos de la COP 28.¹¹

Una declaración en esa conferencia avanzaba en dirección de la necesidad de hacer una transición “más allá de los combustibles fósiles”, que debe entenderse inicialmente como la posibilidad complementaria de disminuir la expansión de la producción de combustibles fósiles y luego su eventual abandono (*phase out*).

Dado que el metano es el componente primario del gas natural, se destaca que las emisiones de metano son una fuente de valor, y esa oportunidad no siempre es aprovechada plenamente por la industria.

Asimismo, hay numerosas opciones para prevenir pérdidas en la producción, especialmente de gas natural, incluyendo entre estas los programas de detección y reparación de fugas (LDAR, por sus siglas en inglés), electrificación o reemplazo de equipos, la introducción de controladores neumáticos de cero emisiones, de tanques con sistemas de recuperación de vapor, de compresores centrífugos, de bombas neumáticas, de deshidratadores, así como la mejora en la terminación de metano de los pozos de petróleo y gas fracturados hidráulicamente (FTDT, 2025; Beck et al., 2020). Estas medidas, de ser aplicadas en plenitud, podrían aportar una reducción de hasta un 40% hacia el 2030.

Asimismo, un esfuerzo coordinado para limitar las emisiones de metano puede hacer que estén disponibles en los mercados unos 100 billones de metros cúbicos adicionales de gas natural, y contribuir a asegurar que mayores volúmenes de gas lleguen a los mercados.

En efecto algunas opciones para reducir las emisiones de metano de un conjunto significativo de fuentes, entre ellas, en los pozos, los ductos y las instalaciones para el procesamiento del combustible, pueden conducir a conservar una porción mayor de un bien transable, como el gas natural, en la entera infraestructura productiva, lo que hace posible aumentar los volúmenes disponibles para su posterior comercialización.

Esa potencial condición sectorial favorable al hacer frente a las emisiones está acompañada de la posibilidad de mejorar la seguridad energética de las operaciones extractivas, a la vez que contribuye a reducir a futuro los riesgos de seguridad en este sector.

Cuando se examina el panorama internacional es posible observar que un grupo de empresas innovadoras demuestra que es posible minimizar las emisiones sectoriales de metano, aunque ese ejemplo no haya sido suficientemente emulado por otros actores empresarios; en efecto la intensidad de emisiones varía más de cien veces entre los mejores y los peores desempeños en esta industria.

Es preciso destacar que hasta el 60% de las emisiones de metano del sector de combustibles fósiles podrían evitarse con las tecnologías ya existentes, con frecuencia a costos reducidos o, en el límite, hasta negativos.

Es muy difícil identificar otro sector productivo que pueda producir reducciones tan considerables de emisiones únicamente atendiendo sus ineficiencias operacionales, lo que

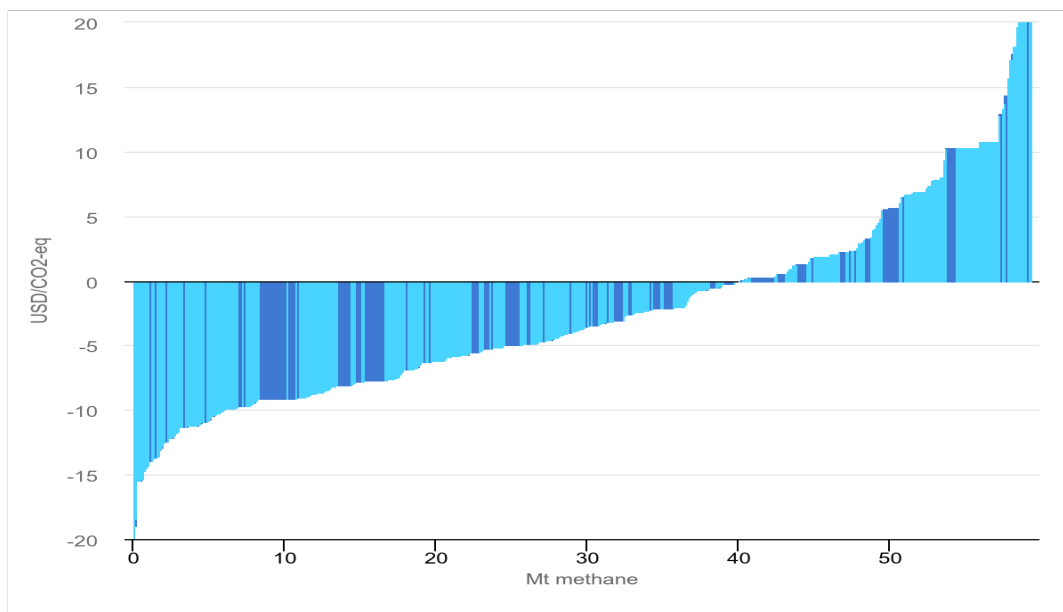
¹¹ Realizada en Dubái, EAU, en 2023.

permitiría disminuir las emisiones globales en aproximadamente un 4% (McKinsey & Co, 2024).

Así, según la Agencia Internacional de Energía, alrededor del 40% de las emisiones de metano de los combustibles fósiles podrían evitarse con un costo neto equivalente a cero (IEA, 2024).

El porcentaje de emisiones que se pueden evitar es, estima la IEA, más elevado en el caso del petróleo y el gas (50%) que en el del carbón (15%) (IEA, 2024). Ver en Figura 4, siguiente.

Figura 4: Curva de costos marginales de abatimiento de las operaciones de petróleo y gas



Columnas: Gas natural ■ Petróleo ■

Fuente: IEA (2024). Global Methane Tracker.

Más aun, las opciones técnicas y los proyectos de inversión para el abatimiento de las emisiones en el sector de petróleo y gas pueden generar altas tasas internas de retorno, aunque los períodos de repago puedan ser algo extendidos en el tiempo.

Esto es posible pues, con frecuencia, los desembolsos necesarios para implementar las medidas de mitigación disponibles son equivalentes o, en algunos casos, inferiores, al valor actual del flujo de caja adicional que resulta de la comercialización del metano recuperado como resultado de la adopción de esas medidas.

Si ese fuera el caso, deberían explorarse las razones por la cuales las empresas no implementan a pleno al menos las potenciales medidas de mitigación que permitirían financiar enteramente los desembolsos necesarios. Las explicaciones respecto de las razones por las que las medidas de mitigación no se adoptan son diversas.

Entre esas causas se cuentan: el largo plazo de retorno de la inversión en proyectos de abatimiento, mayor que en el de proyectos alternativos; el insuficiente entendimiento de la escala de las oportunidades de mitigación existentes y de su costo efectividad; la existencia de emisiones difusas que hacen más complejos los proyectos de mitigación de emisiones; la limitada capacidad previa de medición precisa in situ de las emisiones; y la existencia de obstáculos institucionales al interior de las empresas para darle prioridad a estos proyectos.

Para algunas de las fuentes de emisiones sectoriales de metano, las reducciones pueden definirse como *win-win* (Stavins, R., 2024), en particular, pero no exclusivamente, en el sector de petróleo y gas, pues, según afirma Stavins, combinan la protección de bienes públicos globales con la preservación de los intereses específicos de la industria, a la que las acciones de mitigación le hacen simultáneamente factible incrementar el flujo de sus bienes transables, sea local como internacionalmente, a la vez que reducir los costos de operación.

No obstante, si bien puede detectarse un potencial significativo para implementar esfuerzos de abatimiento del metano a bajo costo, que permitiría incluso alcanzar a reducir las emisiones en alrededor de un 50% respecto de la línea de base, el potencial de mitigación a bajo costo no es ciertamente ilimitado.

Por otra parte, aquellas estimaciones optimistas que suponen la ocurrencia de costos negativos muy extendidos en el sector de petróleo y gas, que con alguna frecuencia se difunden, requieren ser exploradas con cautela.

Es que esa condición de costo negativo para las medidas que se propongan implementar depende de un número considerable de variables, entre las que juega un papel preponderante el precio del combustible a la vez que su potencial variabilidad, los costos de transacción en los procesos de inversión y la posibilidad de determinar con precisión la ubicación de las fuentes de emisiones, así como los costos de inversión en el equipamiento y en los programas asociados a las opciones de mitigación planeadas.

Yendo más allá, para considerar la puesta en vigor de nuevas estructuras de incentivos (desincentivos), existe la posibilidad de introducir la fijación de precios a las emisiones, por lo cual algunos estudios indican que fijar un precio a las emisiones de metano, podría disminuir sustantivamente esas emisiones y además generar considerables beneficios sociales.

Así, según algunos cálculos, establecer una tasa a las emisiones de metano relativamente moderada, de alrededor de 5 dólares la tonelada (de carbono equivalente) podría disminuir las emisiones en hasta un 60%, a la vez que evitar daños climáticos significativos (Marks, L. 2022).

La agricultura

El sector agrícola (agricultura y ganadería) es la mayor fuente de emisiones antropogénicas de metano. Aunque hay numerosas opciones técnicas de reducción de emisiones, el potencial para implementarlas es relativamente más bajo y plantea considerables desafíos especialmente a nivel del productor. En consecuencia, algunas estimaciones respecto del potencial de mitigación de emisiones indican que el sector agrícola podría alcanzar una reducción del 12% en las emisiones sectoriales para el 2030.

No obstante, merece mencionarse que una buena proporción de las emisiones del sector agropecuario pueden concretarse en el futuro inmediato mediante la aplicación de tecnologías ya disponibles.

En efecto, en el caso de la agricultura y la ganadería, las medidas contempladas del lado de la oferta, comprenden distintas categorías; se trata en primer lugar de la adopción de medidas en las explotaciones agrarias que estén destinadas a reducir aquellas emisiones de metano que principalmente resultan:

- i. de la fermentación entérica;
- ii. del manejo del estiércol; y,
- iii. de la producción de arroz;

Las prácticas para reducir las emisiones de metano entérico en el sector ganadero (ganado de carne y de leche) pueden agruparse, de modo general, en, al menos, cuatro categorías:

- a. una ganadería más eficiente, mediante cambios a largo plazo en la administración de los rodeos y en la cría animal;
- b. mejoras en las prácticas de alimentación del stock vacuno, que tienden, entre otros objetivos específicamente productivos, a reducir la intensidad de emisiones de la producción ganadera;
- c. uso de agentes específicos o aditivos dietarios orientados a disminuir la metanogénesis; y,
- d. gestión del estiércol.

El menú de medidas específicas, comprendidas en las cuatro categorías indicadas más arriba, incluye, entre otras, las siguientes: mejoramiento de la salud animal, incremento de la productividad (relación vaca-ternero y valor HCW¹²), optimización del alimento (mejora de la productividad y digestibilidad del forraje, manejo de pasturas y pastoreo a campo), incorporación de estiércol a los suelos, separación de sólidos y líquidos en el proceso de manejo del estiércol, y manipulación del rumen mediante inhibidores químicos y otros medios,

Otras opciones están asociadas a las posibilidades de cambios en los modelos de producción que se emplean, lo que permite disminuir la intensidad de emisiones por kilogramo de peso vivo de carne producido, o acortar el ciclo de producción -desde la cría a la terminación del engorde (la invernada)-, lo que además hace posible disminuir el costo financiero para el productor, desde el desembolso inicial hasta el ingreso final por la venta de la hacienda.

De modo que los resultados de las medidas contempladas incluyen tres dimensiones claves: mejora de la productividad, atenuación de costos financieros y reducción de emisiones.

En Argentina, por ejemplo, la intensidad de emisiones en la producción de terneros varía muy considerablemente, desde 1,1 kilos a 1,9 kilos de metano expresado en kilo de peso vivo producido. Esas variaciones están asociadas a una nutrición inadecuada y deficiente, a una baja o muy baja eficiencia reproductiva, y, con frecuencia, a una elevada proporción de animales de cría en el rodeo, posiblemente debido a la ineficiencia de la fase de cría.

¹² Abreviatura en inglés de *hot carcass weight* (HCW), el peso del animal una vez faenado, sin incluir la cabeza, el cuero y las entrañas.

Respecto del cambio de modelos de producción, en Brasil, Embrapa ha documentado un decrecimiento de la intensidad de emisiones de aproximadamente el 42% por kilo vivo de ganado para carne, cuando la producción pecuaria es realizada en sistemas integrados agrícolas-ganaderos-forestales, que hacen posible incrementar la productividad y reducir el periodo de engorde hasta la faena de ese stock.

Por otra parte, y desde una perspectiva bien distinta, se puedan precisar medidas del lado de la demanda, como la reducción de los residuos y desechos de alimentos, especialmente mediante la optimización de los procesos y los cambios dietarios, disminuyendo el consumo de carne y leche (en el caso de la carne, por ejemplo, el desplazamiento hacia el consumo de carne de animales monogástricos, como cerdos¹³ y aves).

La reducción de los niveles de consumo de carne permite a su vez la disminución del tamaño de los stocks, especialmente los de la ganadería bovina, que serían habilitados por cambios del lado de la demanda.

Las cadenas de provisión de alimentos, a su vez, pueden aportar a evitar considerables emisiones de metano principalmente en la etapa de producción, si bien es posible disminuir las sustantivas pérdidas de alimentos y los desechos a todo lo largo de la entera cadena de la oferta (Porter et al. 2016).

Gestión de residuos

El incremento en la generación de residuos es el correlato del avance de los procesos de urbanización, del aumento sostenido de los ingresos de la población, y del crecimiento demográfico.

A escala global se generan diariamente unos 0,74 kilogramos de residuos per cápita, aunque esos niveles fluctúan muy ampliamente, variando desde un mínimo de 0,11 kilogramos diarios per cápita hasta 4,54 kilogramos, según las regiones y los diversos estratos de ingresos.

El Banco Mundial ha estimado que, a nivel global, los residuos orgánicos dan cuenta de entre el 64% y el 68% de los flujos de residuos sólidos municipales (Banco Mundial, 2018).

La introducción de medidas de mitigación para atender las emisiones provenientes de los residuos sólidos podría permitir lograr una reducción del 39% de las emisiones sectoriales hacia el 2030, mientras podría alcanzarse una reducción del alrededor del 27% en las emisiones sectoriales, para ese mismo año, mediante la introducción de medidas adecuadas para las aguas residuales (DeFabrizio et al., 2021).

Específicamente, en el sector de la gestión de residuos, las categorías de medidas de mitigación que se pueden adoptar comprenden entre otras: la captura de metano en los rellenos sanitarios, en particular las emisiones que provienen de la superficie de trabajo del relleno -donde los residuos recién llegados son depositados en el relleno-, que según algunos estudios constituyen una porción mayoritaria del total (Scarpelli et al., 2024), así como las generadas en la infraestructura de control de gas, desviar los residuos orgánicos con destino a los rellenos sanitarios para el reciclado o la elaboración de compost; reducir la

¹³ La producción porcina no genera emisiones de metano vía fermentación entérica, pero si produce emisiones que resultan de la gestión del estiércol resultante de la cría y engorde de cerdos.

generación de residuos sólidos orgánicos y, asimismo, reducir las emisiones de metano de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Hay pues un menú amplio de soluciones para limitar el metano de los residuos, que son técnicas, pero también comprenden medidas de comportamiento o conductuales. En este conjunto de opciones se pueden incluir la prevención y disminución de la generación de los residuos de los alimentos, el procesamiento de los residuos orgánicos, la conversión de vertederos en rellenos sanitarios bien administrados, y el diseño y la operación de los rellenos para optimizar la recuperación del metano generado, así como la aplicación de soluciones basadas en enfoques que utilizan los residuos para generar energía (típicamente conocidos como *waste to energy*).

Las medidas enunciadas también aportan a proteger la salud de la población localizada en el entorno inmediato de los sitios de disposición y la seguridad de los mismos, evitando explosiones e incendios, pero también alcanza a poblaciones que habitan en lugares más distantes de esos sitios.

Asimismo, es preciso tomar en cuenta las posibilidades de mitigación que resultan del re-uso de productos, el reciclado y el menú de medidas y opciones que vienen asociadas a la adopción con cada vez mayor intensidad a las estrategias de la economía circular.

La validación de los modelos que se utilizan para estimar emisiones empleando mediciones directas, como las que acuden al uso de sensores remotos, pueden mejorar los inventarios de las emisiones de metano de la gestión de residuos.

Avances en la detección de super-emisores y en insumos para la determinación de costos de abatimiento

Es preciso destacar, asimismo, que las acciones destinadas a la reducción de emisiones de metano – con sus consecuentes beneficios- están hoy acompañadas y eventualmente facilitadas por los recientes y significativos avances en el uso de la tecnología de sensores remotos que se ubican a bordo de dispositivos satelitales, tales como el *Tropospheric Monitoring Instrument* (TROPOMI) a bordo del satélite *Copernicus Sentinel-5 Precursor*, lanzado en 2017.

Estas tecnologías, y las asociadas, entrega herramientas de gran utilidad para el monitoreo en tiempo real de las principales fuentes de metano en múltiples sectores y regiones en sus áreas de explotación u operación, identificando sus emisiones, así como llegando al monitoreo a la escala de facilidades y equipos individuales.

Un ejemplo, entre otros, de esos servicios y tecnologías, es la labor que lleva adelante la *Carbon Mapper Coalition*, una organización público-privada sin fines de lucro, que entre sus metas incluye la de avanzar en el entendimiento de las condiciones y operaciones, especialmente, de los super-emisores, utilizando para ello sensores remotos para medir y monitorear regularmente las emisiones de metano y también las de CO₂.

Esta capacidad instalada hace posible identificar tanto a los mayores emisores cuanto las emisiones provenientes de fuentes dispersas, incluso las de más pequeña escala. En consecuencia, es posible detectar los super emisores de metano en los sectores de petróleo y gas, carbón, y también las emisiones usuales en el sector de residuos y en el agropecuario, esto es, aquellas que tienen un mayor impacto en la concentración atmosférica de este gas, pero también medir y monitorear las emisiones dispersas de distintas fuentes.

Asimismo, estos sistemas han permitido revelar emisiones de metano que previamente eran no detectables y también detectar en particular *hotspots* de emisiones que no siempre son registrados en los inventarios nacionales.

La disponibilidad de esta información, precisa y continuamente actualizada, hace posible además contribuir a reducir los costos agregados de las acciones de mitigación.

En efecto, la disponibilidad de las tecnologías de sensores remotos (en combinación con dispositivos satelitales o aéreos) hace posible, asimismo, reducir los costos de mitigación, al permitir monitorear emisiones de metano y detectar fugas en las operaciones de petróleo y gas o identificar y cuantificar las emisiones en las plumas de los rellenos.

Hallazgos e implicancias

En principio, es necesario destacar que actualmente hay un reconocimiento cada vez más amplio de la importancia considerable que tienen hoy las emisiones antropogénicas de metano en la agudización del proceso de cambio climático global que está siendo provocado por la elevada concentración atmosférica de gases de efecto invernadero, a la vez que por el aumento persistente de esa concentración.

Mientras la reducción de las emisiones de dióxido de carbono es necesaria para estabilizar el calentamiento global a largo plazo, se entiende que la reducción de las emisiones de metano constituye una de las opciones más costo-efectivas para limitar el cambio climático en el futuro próximo, a la vez que su implementación tiene un efecto positivo sobre la calidad del aire y sobre otras dimensiones relevantes sean sociales como ambientales.

Ese potencial es particularmente importante hoy, dado que esta década es crítica para alcanzar la meta de mitigación global establecida en el Acuerdo de París, que implica mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2° C y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5° C, en ambos casos con respecto a los niveles preindustriales.

De acuerdo con el *Global Methane Assessment*, del Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente, aquel último objetivo no podría ser alcanzado si no se reducen las emisiones de metano en por lo menos entre el 40% y el 45% al año 2030, por comparación con los niveles de 2020 (UNEP, 2021).

Consecuentemente, se ha profundizado la preocupación y se han multiplicado los esfuerzos por impulsar la reducción de las emisiones de metano, a la vez que por discernir los procedimientos, tecnologías y métodos para lograr ese objetivo con la mayor celeridad dada la gravedad de la emergencia climática y determinar asimismo los necesarios medios de implementación.

Complementariamente, ha habido una intensificación del examen de las mejores políticas orientadas a esa finalidad, así como de los mecanismos de incentivos y las regulaciones que promuevan la implementación de las acciones de mitigación necesarias, mediante el empleo de las numerosas tecnologías disponibles en cada uno de los distintos sectores cuyas actividades son las mayores fuentes de emisiones de metano.

Esas tecnologías son, con frecuencia, opciones maduras y que ya han sido suficientemente probadas.

Cuando se sintetizan los hallazgos de esta nota de discusión, pueden destacarse, entre otros varios, las siguientes:

- Se constata que las emisiones y las concentraciones atmosféricas de metano continúan creciendo, a pesar de las opciones de mitigación disponibles y, en muchos casos, de la conveniencia económica y financiera de poner en valor esas medidas.
- De hecho, las concentraciones de metano en la atmósfera se han elevado más rápidamente en los últimos cinco años que en cualquier otro periodo anterior desde que se llevan registros de esas concentraciones.
- **Es posible anticipar que, conforme las emisiones proyectadas de la línea de base global, las emisiones de metano antropogénico todavía no han alcanzado**

su máximo y continuarán creciendo en los distintos sectores claves, si bien a distintas tasas en cada uno de ellos, a menos que se adopten políticas y medidas para mitigarlas.

- Unas reducciones aceleradas y sostenidas en el tiempo de las emisiones de metano son, en consecuencia, cruciales para limitar rápidamente el calentamiento global.
- La importancia relativa del metano, por contraste con el dióxido de carbono, ponderada en términos de cambios de temperatura, radica tanto en su menor período de permanencia en la atmósfera, como en su considerablemente mayor forzamiento radiativo. También incide actualmente la aceleración de la tasa de crecimiento de la concentración atmosférica de metano que se ha producido en la última década.
- El extenso y creciente cuerpo de investigación disponible en la materia indica que la reducción de emisiones de metano puede ser más económica que la reducción de emisiones del dióxido de carbono para un mismo beneficio comparado.
- Hay un potencial considerable para la reducción de emisiones de metano a bajo costo, y -aunque en bastante menor medida- a costo negativo, especialmente en el sector de petróleo y gas.
- Los avances recientes en las tecnologías de sensores remotos y la expansión acelerada de las capacidades satelitales ponen a disposición valiosas herramientas para el monitoreo en tiempo real de las fuentes de emisiones de metano de los distintos sectores.
- Esa capacidad tecnológica permite hoy identificar a los mayores emisores -entre ellos los super-emisores-, así como identificar y mensurar las emisiones provenientes de fuentes pequeñas y difusas y hacerlo con la apropiada granularidad. Esta posibilidad también contribuye a facilitar poner en vigor políticas, introducir mecanismos de incentivos, y adoptar regulaciones adecuadas, con el fin de reducir las emisiones en base a información confiable, robusta y actualizada.
- La disponibilidad de las tecnologías de sensores remotos (en combinación con dispositivos satelitales o aéreos) hace posible, asimismo, contribuir a reducir los costos de mitigación, al permitir monitorear emisiones de metano y detectar fugas -regulares o extraordinarias- en las operaciones de petróleo y gas, o identificar las plumas de metano de los rellenos sanitarios, así como controlar las emisiones en los otros sectores relevantes.

Por las razones sustantivas enunciadas más arriba es conveniente explorar ulteriormente las oportunidades de reducción de emisiones de metano en las fuentes, para lo cual es conveniente a la vez avanzar en la estimación de los costos marginales de abatimiento de las emisiones en los distintos sectores, economías y mercados, haciendo un análisis específico para las distintas estructuras productivas nacionales.

Asimismo, en una perspectiva sectorial, es aconsejable, tanto desde el punto de vista público como desde la mirada privada, elucidar y cuantificar los beneficios económicos y financieros de los aumentos de eficiencia en la producción ganadera, que también se reflejan como

mejoras de la eficiencia ambiental, permiten disminuir los impactos ambientales de la producción, y también reducir costos de operación, a la vez que potenciar la competitividad de la producción pecuaria y de las industrias que integran su extensa cadena de valor.

En otro plano, como ya viene sucediendo, es ventajoso considerar también en profundidad las variadas opciones técnicas para maximizar la eficiencia en la producción de petróleo y gas, mediante la introducción de tecnologías ya suficientemente probadas para evitar pérdidas y fugas, a la vez que resulta beneficioso impulsar el aprovechamiento integral de los recursos que ya se están explotando, aumentar luego los volúmenes de producción, y generar flujos de fondos adicionales por esta vía.

Asimismo, por diversos motivos -sociales, ambientales y económicos- es conveniente examinar las posibilidades que existen para optimizar la eficiencia de los sistemas que hoy se aplican para la gestión de los residuos y de las aguas residuales, de manera de mejorar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad de las actividades que se desenvuelven en este sector y atenuar sus efectos ambientales y sociales, cuando se logra reducir las emisiones de metano y de otros gases.

Finalmente, según sostienen los expertos, es difícil concebir que la meta de 1,5° C pueda ser alcanzada sin esfuerzos de mitigación de emisiones de metano que sean a la vez decididos, explícitos y ambiciosos. También es necesario procurar que esas iniciativas se implementen aceleradamente, en línea con la urgencia de los procesos en desarrollo, para evitar o morigerar los estragos que ocasiona el cambio climático, y con el propósito de evitar que aumente la posibilidad que se produzcan puntos de inflexión negativos que ponen en riesgo la existencia de sociedades y ecosistemas.

Referencias bibliográficas

- Aldy, J. E., Reinhardt, F. L., y Stavins, R. N. (2025). Methane Abatement Costs in the Oil and Gas Industry: Survey and Synthesis. Discussion Paper HMI-1. Cambridge, Massachusetts: Harvard Initiative on Reducing Global Methane Emissions. March 4, 2025.
- Beck, C., Rashidbeigi, S., Roelofsen, O. and E. Speelman (2020). The future is now: How oil and gas companies can decarbonize. January 7, 2020, McKinsey.com.
- Byrne, B., Baker, D. F., Basu, S., Bertolacci, M., Bowman, K. W., Carroll, D., Chatterjee, A., Chevallier, F., Ciais, P., Cressie, N., Crisp, D., Crowell, S., Deng, F., Deng, Z., Deutscher, N. M., Dubey, M. K., Feng, S., García, O. E., Griffith, D. W. T., Herkommer, B., Hu, L., Jacobson, A. R., Janardanan, R., Jeong, S., Johnson, M. S., Jones, D. B. A., Kivi, R., Liu, J., Liu, Z., Maksyutov, S., Miller, J. B., Miller, S. M., Morino, I., Notholt, J., Oda, T., O'Dell, C. W., Oh, Y.-S., Ohyama, H., Patra, P. K., Peiro, H., Petri, C., Philip, S., Pollard, D. F., Poulter, B., Remaud, M., Schuh, A., Sha, M. K., Shiomi, K., Strong, K., Sweeney, C., Té, Y., Tian, H., Velazco, V. A., Vrekoussis, M., Warneke, T., Worden, J. R., Wunch, D., Yao, Y., Yun, J., Zammit-Mangion, A., and Zeng, N. (2023). National CO₂ budgets (2015–2020) inferred from atmospheric CO₂ observations in support of the global stocktake, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 963–1004, <https://doi.org/10.5194/essd-15-963-2023>.
- CCAC (2021). Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions.
- Climate Impact Lab (2022). Data-Driven Spatial Climate Impact Model User Manual. [Version 092022-EPA]. Climate Impact Lab.
- Crippa, M. *et al* (2021). GHG emissions of all world countries—2021. Report *EUR 30831* (Luxembourg: Publications Office of the European Union)
- Chang *et al.* (2021). The key role of production efficiency changes in livestock methane emission mitigation. *AGU Advances*, 2, e2021AV000391.
- DeFabrizio *et al.* (2021). Curbing methane emissions: How five industries can counter a major climate threat. McKinsey Sustainability.
- Dunsy Energy & Climate Advisors (2023). Canada's Methane Abatement Opportunity. Report prepared for Environmental Defense Fund.
- Duren, R. and Gordon, D. (2022). Tackling unlit and inefficient gas flaring. *Science*. Vol. 377, No. 6614
- FAO & New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre (2017). Low Emissions Development of the Beef Cattle Sector in Argentina. Reducing enteric methane for food security and livelihoods.
- Ferreira and McCabe (2024). Focus on reducing methane pollution from all sources, not distraction over metrics.
- Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J. L. Dufresne, D. Frame, D. J. Lunt, T. Mauritsen, M. D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, H. Zhang, (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.
- Gorham, K.A., Abernethy, S., Jones, T.R., Hess, P., Mahowald, N.M., Meidan, D., Johnson, M.S., van Herpen, M.M.J.W., Xu, Y., Saiz-Lopez, A., *et al.* (2024). Opinion: A research roadmap for exploring atmospheric methane removal via iron salt aerosol. *Atmos. Chem. Phys.* 24, 5659– 5670.
- Guimaraes, R. (2017). From weaning to slaughter, reductions per kg of live weight. Embrapa Cerrados, Brasil.
- Hausfather, Z. (2017). "Analysis: Global CO₂ Emissions Set to Rise 2% in 2017 after Three-Year 'Plateau'." *CarbonBrief*, November 13.

- Höglund-Isaksson L, Gómez-Sanabria A, Klimont Z, Rafaj P, Schöpp W. (2020). Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model. *Environ Res Commun*.
- Howard PH, Sterner T (2017). Few and not so far between: a meta-analysis of climate damage estimates. *Environ Resour Econ* 68(1):197–225.
- International Energy Agency (2025). *Global Methane Tracker 2025*. IEA, Paris.
- International Energy Agency (2024). *Global Methane Tracker 2024*. IEA, Paris.
- International Energy Agency (2024). *Marginal abatement cost curve for methane emissions from fossil fuel operations, 2023*. Figure. IEA, Paris.
- International Energy Agency (2023). *Global Methane Tracker 2023*. IEA, Paris.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021 – The physical science basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1st ed.)*. Cambridge University Press.
- IPCC (2021). *Summary for policymakers (AR6) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jackson, R.B., Saunio, M., Martinez, A., Canadell, J.G., Yu, X., Li, M., Poulter, B., Raymond, P.A., Regnier, P., Ciais, P., et al. (2024). Human activities now fuel two-thirds of global methane emissions. *Environ. Res. Lett.* 19, 101002.
- Jackson, R.B., Saunio, M., Bousquet, P., Canadell, J.G., Poulter, B., Stavert, A.R., et al. (2020). Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environ Res Lett* 15 (7):071002.
- Kaza, S.; Yao, L. C.; Bhada-Tata, P.; y Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development.
- Khanna, N., Lin, J., Liu, X. et al. An assessment of China’s methane mitigation potential and costs and uncertainties through 2060. *Nat Commun* 15, 9694 (2024).
- Lade, G. E. and Rudik, I. (2020). “Costs of Inefficient Regulation: Evidence from the Bakken.” *Journal of Environmental Economics and Management* 102: 1-19.
- Lan, X., Thoning, K. W., and Dlugokencky, E. J. (2024). Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements Version 2024-02, Global Monitoring Laboratory.
- Lauvaux, T., Giron, C., Mazzolini, M., d’Aspremont, A., Duren, R., Cusworth, D., et al. (2022). Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters. *Science* 375(6580):557–61.
- Liu, G., Shen, L., Ciais, P. et al. Trends in the seasonal amplitude of atmospheric methane. *Nature* 641, 660–665 (2025).
- McKinsey and Company (2024). *The true cost of methane abatement: A crucial step in oil and gas decarbonization*.
- Malley, C.S., Borgford-Parnell, N., Haeussling, S., Howard, I.C., Lefe`vre, E.N., and Kuylenstierna, J.C.I. (2023). A roadmap to achieve the global methane pledge. *Environ. Res, Climate* 2, 011003.
- Marks, L. (2022). “The Abatement Cost of Methane Emissions from Natural Gas Production.” *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, Volume 9, Number 2, pp. 165-198.
- Maasackers, J.D., Varon, D.J., Elfarsdottir, A., McKeever, J., Jervis, D., Mahapatra, G., Pandey, S., Lorente, A., Borsdorff, T., Foorhuis, L.R., et al. (2022). Using satellites to uncover large methane emissions from landfills. *Sci. Adv.* 8, eabn9683.
- McDaniel, M. (1983). *Flare Efficiency Study (EPA/600/2-83/052)*, U.S. Environmental Protection Agency.
- Michel, S. E., Lan, X., Miller, J., Tans, P., Reid Clark, J., Schaefer, H., Sperlich, P., Brailsford, G., Morimoto, S., Moosen, H. y Li, J. (2024). Rapid shift in methane carbon isotopes suggests microbial emissions drove record high atmospheric methane growth in 2020–2022.
- Mukherji, A., Arango, J., Flintan, F., Derera, J., Francesconi, W., Jones, S., Loboguerrero, A.M., Merrey, D., Mockshell, J., Quintero, M., et al. (2023). *Agricultural Breakthrough: A deep dive into seven technological areas*. Montpellier: CGIAR.

- Nisbet, E. G., Jones, A. E, Pyle, J. A. and Skiba, U. (2021). Rising methane: is there a methane emergency? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*.
- Nisbet, E. G. et al. Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014–2017: implications for the Paris Agreement. *Glob. Biogeochem. Cycles* 33, 318–342 (2019).
- Ocko, I.B., Sun, T., Shindell, D., Oppenheimer, M., Hristov, M.N., Pacala, S.W., Mauzerall, D. L., Xu, Y., and Hamburg, S. P. (2021). Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. *Environ. Res. Lett.*, 16 (2021), p. 054042.
- Olczak, M., Piebalgs, A., and Balcombe, P. (2023). A global review of methane policies reveals that only 13% of emissions are covered with unclear effectiveness. *One Earth* 6, 519–535.
- Peng, S. Lin, X., Thompson, R.L et al. (2022). Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020. *Nature* 612, 477–482.
- Plant et al. (2022). Inefficient and unlit natural gas flares both emit large quantities of methane. *Science* 377, 1566.
- Pohl, J. H., Tichenor, B. A., Lee, J., and Payne, R. (1986). Combustion efficiency of flares. *Combust. Sci. Technol.* 50, 217–231.
- Porter, S.D., Reay, D.S., Higgins, P., y Bomberg, E. (2016). A half-century of production-phase greenhouse gas emissions from food loss & waste in the global food supply chain. *Sci. Total Environ.* 571, 721–729.
- Rennert K, Errickson F, Prest BC, Rennels L, Newell RG, Pizer W, et al. (2022). Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂. *Nature* 610 (7933):687–92.
- Rohde, R. (2024). *Temperature Update* (Berkeley Earth, 2024).
- Rohde, R. A. y Hausfather, Z. (2020). The Berkeley Earth land/ocean temperature record. *Earth Syst. Sci. Data* 12, 3469–3479.
- Rogelj, J., Fransen, T., den Elzen, M., Lamboll, R., Schumer, C., Kuramochi, T., Hans, F., Mooldijk, S., Portugal-Pereira, J. (2023). Credibility gap in net-zero climate targets leaves world at high risk. Looking at policies instead of promises shows that global climate targets may be missed by a large margin. *Policy Forum, Climate Policy. Science*.
- Rubino, M. et al. (2019). Revised records of atmospheric trace gases CO₂, CH₄, N₂O, and δ C-CO₂ over the last 2000 years from Law Dome, Antarctica. *Earth Syst. Sci. Data* 11, 473–492 (2019).
- Saunio, M., Martinez, A. Poulter, B., Zhang, Z., Raymond, P., Regnier, P., Canadell, J. G., Jackson, R.B., Patra, P. K., Bousquet, P. et al. (2024). Global Methane Budget 2000–2020. *Earth Syst. Sci. Data Discuss*.
- Scarpelli, T. R., Cusworth, D. H., Duren, R. M., Kim, J., Heckler, J., Asner, G. P., Thoma, E., Krause, M. J., Heins, D. and Thornehoe, S. (2024). Investigating Major Sources of Methane Emissions at US Landfills.
- Shindell, D., Sadavarte, P., Aben, S., de Oliveira Bredariol, T., Dreyfus, G., Höglund-Isaksson, L., Poulter, B., Saunio, M., Schmidt, G.A., et al. (2024). The methane imperative. *Frontiers in Science*.
- Skeie, R.B., Hodnebrog, O. y Myhre, G. (2023). Trends in atmospheric methane concentrations since 1990 were driven and modified by anthropogenic emissions. *Commun Earth Environ* 4, 317.
- Smith, P., Reay, D. and Smith, J. (2021). Agricultural methane emissions and the potential for mitigation. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 379: 20200451
- Smith P et al. 2014 Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In *Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (eds O Edenhofer et al.), pp. 811–922. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Stavins, R. (2024). How Reducing Methane Emissions Will Slow Climate Change. Harvard Advanced leadership Initiative Social Impact Review. Q&A.
- Stoddard, I. et al. (2021). Three Decades of Climate Mitigation: Why Haven't We Bent the Global Emissions Curve? *Annual Review of Environment and Resources* Volume 46, 2021. Vol. 46:653-689.

- The United Nations Environmental Program, Climate and Clean Air Coalition (2022). Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions.
- Thompson, R.L. et al., 2018: Variability in Atmospheric Methane from Fossil Fuel and Microbial Sources Over the Last Three Decades. *Geophysical Research Letters*, 45(20), 11499–11508.
- Thorpe, A.K., Green, R.O., Thompson, D.R., Brodrick, P.G., Chapman, J. W., Elder, C.D., Irakulis-Loitxate, I., Cusworth, D.H., Ayasse, A.K., Duren, R.M., et al. (2023). Attribution of individual methane and carbon dioxide emission sources using EMIT observations from space. *Sci. Adv.* 9, eadh2391
- United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition (2021). Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. Nairobi: UNEP.
- United States Environmental Protection Agency. Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances. Washington, DC: U.S. EPA (2023).
- World Meteorological Organization (2025). State of the Global Climate 2024. WMO-No. 1368.
- Zhang, Z., Poulter, B., Feldman, A. F., Ying, Q., Ciais, P. Peng, S. y Li, X. (2023). Recent intensification of wetland methane feedback. *Nat. Clim. Change*, 13 (2023), pp. 430-433.