

Estado actual y futuro de las medidas para la mitigación del cambio climático

Juan Francisco Cedano Lezcano *

Sistemas Mecánicos Tabasco, CIATEQ A.C, Tabasco, México.

* Autor de correspondencia: juan.cedano@ciateq.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 15 de agosto de 2025

Publicado: 6 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.516>

Resumen: En este estudio se presenta un recuento general del estado actual y futuro para mitigar el calentamiento global del planeta, y se plantean acciones para disminuir las emisiones de gases efecto invernadero y la captura y secuestro de CO₂. La contribución actual del uso de fuentes renovables tales como la energía solar, eólica, geotermia, bioenergía y soluciones de electromovilidad es baja, y las medidas hasta ahora establecidas para prevenir el incremento de la temperatura en 1.5 °C para 2030, no han tenido el impacto esperado. Aun cuando existen compromisos de los países, la mayoría de ellas solo son en el discurso. Se plantean acciones de gran alcance para la reducción de CO₂ en la atmósfera, desde la captura y secuestro hasta acciones más lentas en actividad agropecuarias y forestales para el secuestro de grandes cantidades de carbono. Acciones de mayor impacto, aun con riesgos no dimensionados incluyen la manipulación del medio ambiente a través de proyectos de geoingeniería para lograr el enfriamiento del planeta y la captura y secuestro del carbono. En conclusión, con las medidas actuales y las previstas a corto plazo, no se provee reducir el calentamiento global del planeta, menos aún si se sigue manteniendo el mismo nivel de vida de alto consumo energético de la población, asociado al crecimiento poblacional; y buscando solamente la eficiencia energética de los procesos.

Palabras clave: cambio climático, renovable, medio ambiente, calentamiento global.

Introducción

El cambio climático reconocido formalmente desde 1992, se refiere al incremento gradual de la temperatura del planeta y a la modificación de los patrones de comportamiento del clima. Aunque este cambio se puede asociar a fenómenos naturales, se ha concluido que el incremento de la temperatura se promueve de forma importante por la actividad antropogénica en general y un caso particular por el uso de combustibles fósiles en la actividad humana; estos combustibles emiten diversos contaminantes que provocan gases efecto invernadero (GEI) y calientan la atmósfera terrestre. Dadas las consecuencias que puede originar esta modificación de los patrones climáticos y los consecuentes desastres, hoy en día existe una alarma generalizada por la contención del incremento de la temperatura, que a saber no deberá superar 1.5 °C para 2030; por esta razón diversos países, desde 1992 se han comprometido de forma voluntaria u obligatoria a mitigar las emisiones contaminantes, siendo una opción el cambio de fuentes de energía de origen fósil por aquellas renovables. La necesidad de mantener el mismo ritmo de desarrollo económico y nivel de vida, eficientizando procesos y manteniendo casi el mismo nivel de consumo energético, han impedido un impacto notorio en la reducción de emisiones, razón por la cual el incremento de temperatura sigue al alza y se pronostica que antes de 2060, se lleguen a valores que superen los 2 °C. La contribución de las energías renovables a la transición de energías contaminantes a no contaminantes es notoriamente baja, y su participación en el mercado se debe más a factores de tipo comercial y económico, que a razones consientes del cuidado del medio ambiente. Mas aún porque un alto porcentaje de las fuentes de energía utilizadas en la actividad humana provienen de combustibles fósiles tales como el petróleo, el carbón y el gas. Por lo anterior, en este trabajo se presenta un recuento del estado actual y futuro de las acciones para la mitigación del cambio climático, en este trabajo se analizan las mediadas actuales, las proyecciones a 2030 y las tecnologías emergentes con el que se pretende mostrar las acciones que se llevan a cabo y futuras encaminadas a eliminar las emisiones contaminantes.

Este trabajo realizó mediante la recopilación y análisis de información de fuentes bibliográficas recientes no menores a 5 años, provenientes de trabajos de investigación, revistas de divulgación científica, artículos de prensa, trabajos de tesis, e informes de instituciones públicas y privadas a nivel mundial. El objetivo, fue conjuntar información que permitan bosquejar un panorama general del estado actual del uso de las fuentes de energía convencionales y no convencionales, las emisiones de GEI generadas por ellas y las acciones presentes para su mitigación, así como las posibles acciones que se están proyectando en el corto plazo para reducir las emisiones, contener la temperatura global del planeta y mitigar el cambio climático.

Desarrollo

Al término de segunda guerra mundial en 1945, el crecimiento poblacional y económico se aceleró, requiriendo más energía para los procesos productivos. A partir de ese año y hasta inicios de los años 70s, las fuentes principales de energía provinieron de la biomasa como fuente primaria para la combustión, seguida del carbón mineral, el petróleo y el gas, y empieza a figurar la hidroelectricidad, (Figura 1) (Martín de la Plaza, 2021). El consumo de energéticos para 1945 fue del orden de 26 TWh y para 2019, 74 años después, el consumo ya fue de 148 TWh. El uso de fuentes renovables de energía fue visible a partir de los años 90s, cuando se reconoce que el planeta registra un incremento de su temperatura, debido a la acumulación de GEI. Para 2022, la contribución de las energías renovables fue de orden de 14.4% con energía solar, eólica y otras menores como geotermia y mareomotriz (Arenales, J.V., 2023). Asociado al crecimiento poblacional y económico después de 1945 y al incremento en el uso de combustibles fósiles, se incrementa de forma alarmante las emisiones contaminantes que en 1945 estuvieron en el orden de 5,000 Millones de toneladas de CO₂e, y para 2023, las emisiones llegaron a 37,400 millones de toneladas (FORBES, 2023), siendo que el mayor incremento ha sucedido en los últimos 30 años con el 52.7% (BBC News Mundo, 2021). Este crecimiento en emisiones se asocia directamente al crecimiento poblacional, para 1980 la población fue de aproximadamente 4,500 millones, y para 2023 superó los 8,000 millones (Naciones Unidas México, 2023). Las cifras actuales indican que el 82 % del consumo mundial de energía se basa combustibles de origen fósil tales como el petróleo, el carbón y el gas natural, lo cuales son los promotores fundamentales de las emisiones de GEI, y que además el 80% de dicha energía se utiliza para el transporte, que significa la movilidad tanto de personas como de mercancías (Radar Energético, 2023). Basado en este escenario, se percibe inalcanzable la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera en el corto tiempo considerando que se tiene una meta definida para el año 2030.

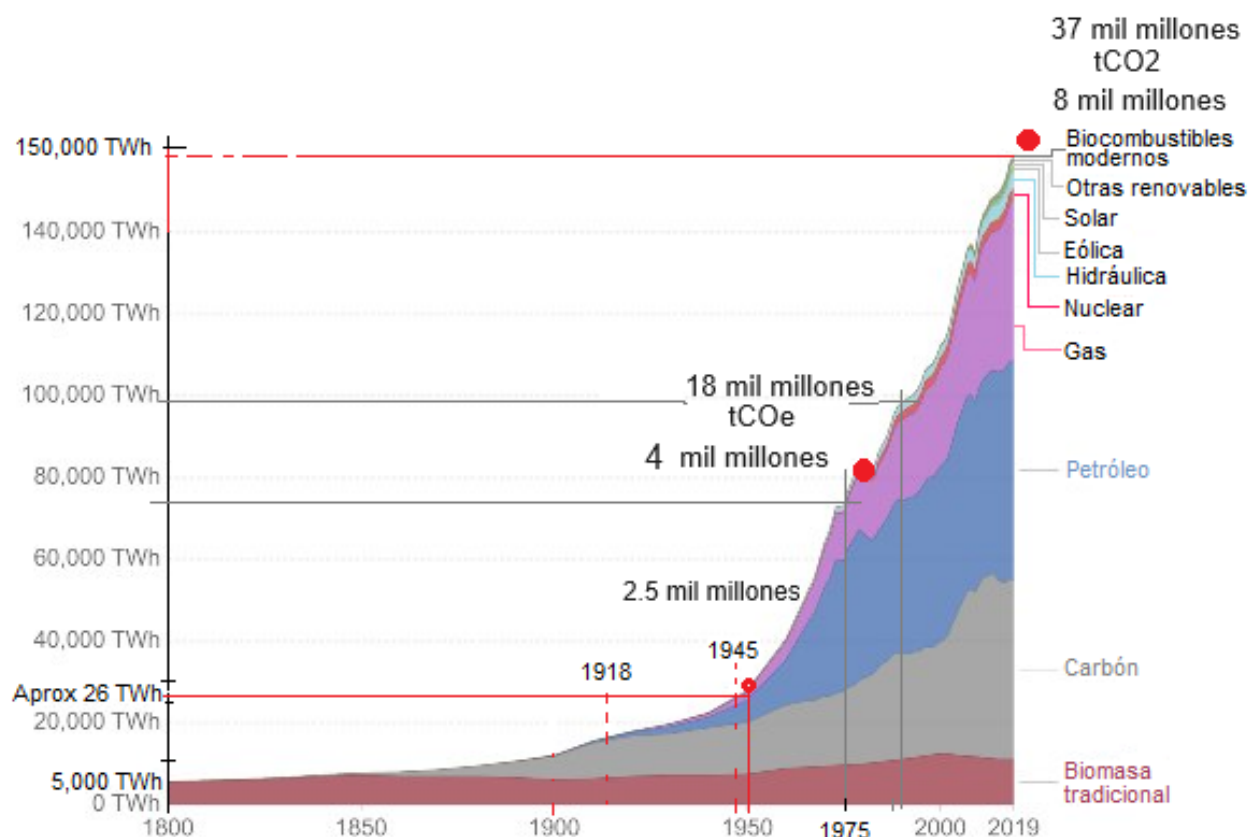


Figura. 1. Aportación energética de las diferentes fuentes a través del tiempo (adaptado de Martín de la Plaza, I., 2021 y datos de Global Carbón Project, 2023).

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía citado por FORBES, en 2022 las emisiones contaminantes tuvieron un crecimiento de 1.3%, las cuales disminuyeron para 2023 a 1.1 %, lo que se atribuyó al uso de energías alternas. Se menciona que esta disminución pudo ser mayor, pero se vio afectada por la reapertura de la economía china, el

aumento del uso de combustibles fósiles en países con escasa producción hidroeléctrica y la recuperación del sector de la aviación.

Acuerdos de las COPs

El reconocimiento del problema del calentamiento global del planeta se inició en 1988 con la creación del Panel Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC), dentro del programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y la Organización Meteorológica Mundial (OMM). El primer informe de evaluación de 1992 (Global Carbon Project, 2021), reconoce la existencia del efecto invernadero y que las emisiones producidas por la actividad antropogénica aumentan las concentraciones atmosféricas de gases que potencian el efecto invernadero. A través del tiempo, de los estudios del IPCC y de la creación de la Conferencia de las Partes (COP), se identifican tres procesos biofísicos de alto riesgo que contribuyen al deterioro del planeta: la desertificación, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático, todos ellos dependientes, relacionados y asociados al crecimiento poblacional y al desarrollo económico. A la fecha se han llevado 28 reuniones, la última se realizó en Dubái, lográndose uno los mayores acuerdos, y en vísperas de pronósticos de grandes catástrofes. Se logra, en el discurso, el conceso de los países miembros que señala "...el principio del fin de los combustibles fósiles, lo cual se considera inevitable" (Pacto Mundial Red España, 2023). De igual forma se establece que para limitar el calentamiento global a 1,5°C, se deben reducir las emisiones mundiales de GEI un 43% hasta 2030 y un 60% hasta 2035 en relación con los niveles de 2019, y alcanzar las emisiones netas de dióxido de carbono cero para 2050. Se establece como objetivo para 2030 triplicar la capacidad global de energías renovables y duplicar la tasa media anual mundial de mejora de la eficiencia energética. De esta lógica, y considerando que la producción promedio per cápita de CO₂ actual es de 4.3 ton (Banco Mundial, 2023), se tendría que limitar la actividad antropogénica de aproximadamente 3,400 millones de personas para lograr la meta de 2030 para dejar de producir 14,800 millones de toneladas de CO₂, o aproximadamente 5,100 millones de personas para 2035. Dado que es imposible limitar la actividad humana, será necesario suplir el consumo de energía contaminante por renovable para sostener el mismo ritmo de crecimiento, o desarrollar formas masivas de captura de CO₂.

En la figura 2 se muestran cuatro escenarios que pueden suceder para la mitigación del calentamiento global. El primero y con las políticas actuales, muestra cambios poco significativos que tan solo reducirían el 11% de emisiones de aquí a 2030; el escenario para lograr mantener 1.5 °C, solo permitiría generar un máximo de 380 GtCO₂ e a⁻¹ (gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente por año) de gases de aquí a 2040, que es el escenario ideal, pero es difícil de contener.

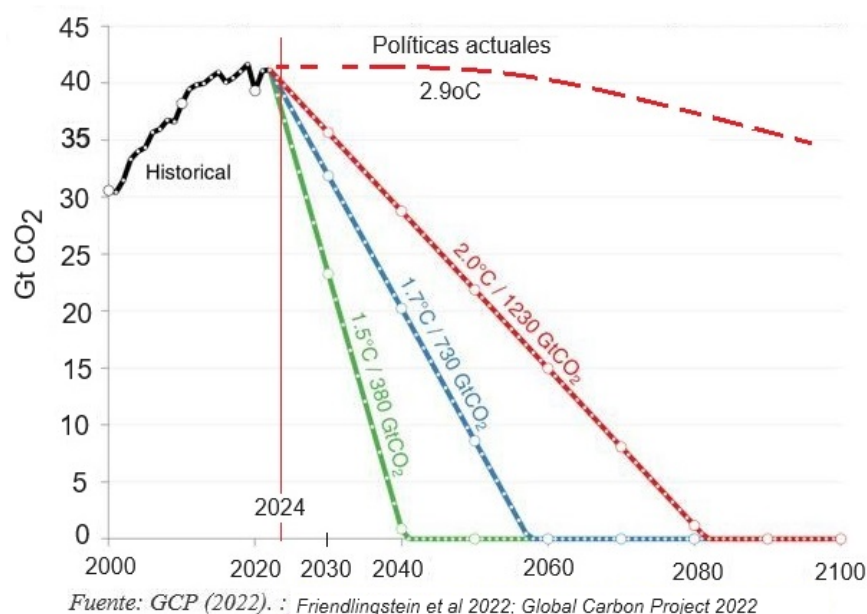


Figura. 2. Escenario para limitar el incremento global de la temperatura para CO₂e nulo (adaptado de Antonio Serrano, 2022).

El cambio climático monitoreado principalmente por el incremento de la temperatura promedio del planeta se acerca los límites que pueden provocar grandes catástrofes; de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (2023) citado por ONU-Mex (2023), existe un 66 % de probabilidades de que la temperatura media anual cercana a la superficie, entre 2023 y 2027, supere, en más de 1.5 °C, los niveles preindustriales durante al menos un año. Existe la probabilidad de un 98 % de que, al menos uno de los próximos cinco años, sea el más cálido jamás registrado (World Meteorological Organization. 2023). Aun cuando el tema se ha venido atendiendo desde las cumbres climáticas, los resultados no han tenido el impacto esperado, teniendo un crecimiento lento; los esfuerzos se han orientado a tres líneas fundamentales: eficiencia energética, uso de fuentes renovables de energía y captura de carbono, y en los últimos años, se concibe la idea de la manipulación del clima, y la captura y secuestro de CO₂, así como el uso de fuentes de energías promisorias como el hidrógeno.

De acuerdo con estos antecedentes, se revisan las acciones generales que se realizan para mitigar el cambio climático y las acciones presentes y futuras para lograr una transición energética a combustibles más limpios, o reducir la presencia de CO₂ o de alguna forma enfriar al planeta, o secuestrar el CO₂ para detener el incremento de la temperatura global del planeta (Figura 3).

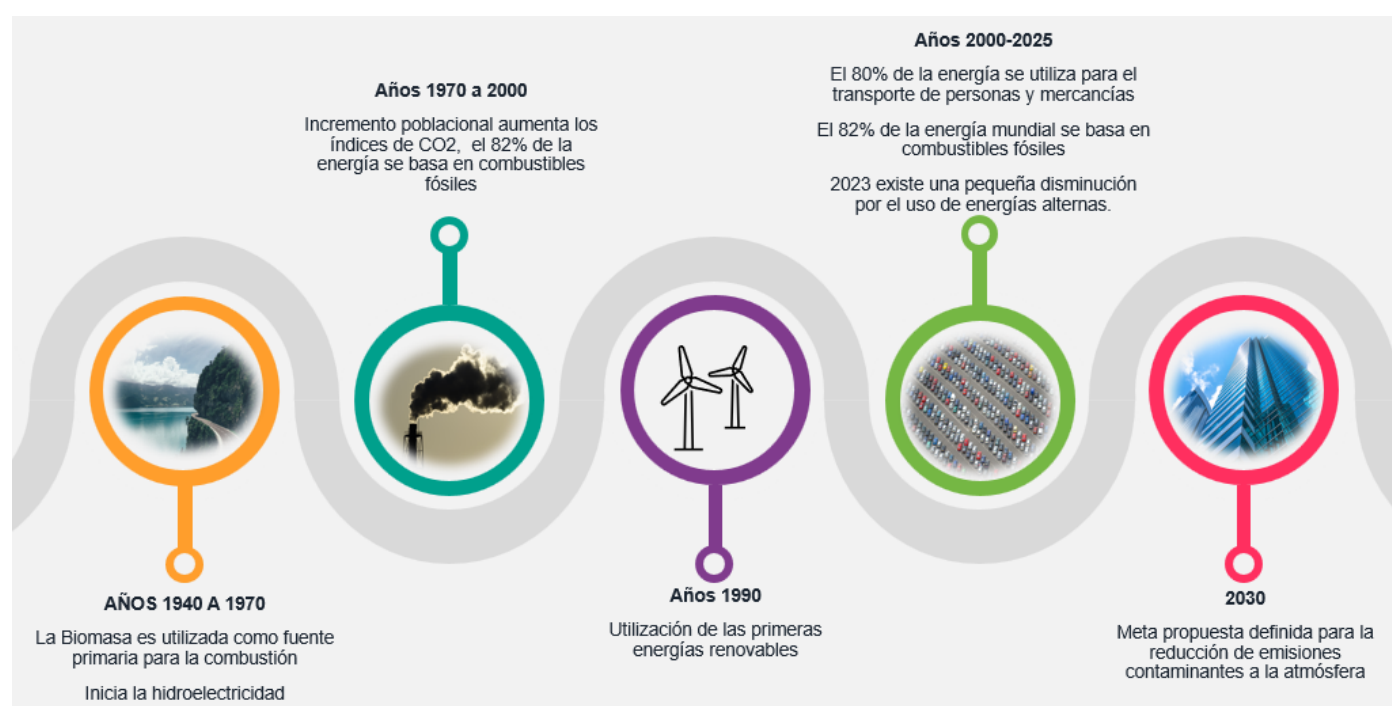


Figura 3. Línea de tiempo de principales fuentes de generación de gases contaminantes Vs energías alternas.

Metas climáticas internacionales a 2030 y 2050

Para lograr esto, el IPCC de la ONU ha considerado tres categorías de acciones: (1) reducir las emisiones, (2) adaptarse a los impactos climáticos y (3) financiar los ajustes necesarios. Aun cuando diversos países se han comprometido a alcanzar cero emisiones para 2050, se debe prever que al menos la mitad de la reducción deberá suceder antes de 2030 para mantener los niveles de temperatura por debajo de 1.5 °C. Para lograr esto, se requiere grandes reducciones en el uso de carbón, petróleo y gas; se debe reducir en más de dos tercios la extracción de las reservas actuales confirmadas de combustibles fósiles, lo cual parece imposible. Lograr estas metas globales, exige medidas en tres frentes: políticas firmes para alcanzar emisiones netas cero de aquí a 2050, medidas decididas para adaptarse al calentamiento global que ya es permanente, y respaldo financiero sólido para ayudar a los países vulnerables a costear estos esfuerzos (Kristalina Georgieva, 2022). A la fecha, aproximadamente 140 países como China, Estados Unidos, la India, la unión europea, Rusia, Japón, Australia y Brasil que representan el 91% de las emisiones de GEI, dentro de sus políticas, acciones y concepciones globales han implantado y planteado como meta emisiones netas cero para mediados de siglo; sin embargo, aún no se perciben avances notables en la reducción de emisiones. Lograr emisiones

netas cero requiere de acciones contundentes de la mayoría de los países, sobre todo de las grandes economías, que son las más contaminantes.

Acciones presentes y futuras

Las acciones ya implementadas para transitar de energías contaminantes a limpias muestran un futuro prometedor tales como la eólica, solar, geo, mareomotriz y bioenergía, al existir instalaciones que en mayor o menor grado han contribuido a la generación de energías limpias, y que fundamentalmente obedecen a su factibilidad técnica y económica cuyo éxito les ha permitido mantenerse en el mercado. Sin embargo, existen otras acciones que están promoviendo la tan urgente transición energética. Dentro de las políticas, acciones y concepciones globales que están implementando y planteando algunos países, se pueden citar: la educación para el cambio climático, el concepto de economía verde y bonos de carbono, impuestos ambientales, programas y planes de transición energética, el secuestro de carbono, y la geoingeniería, entre otras (Figura 4).

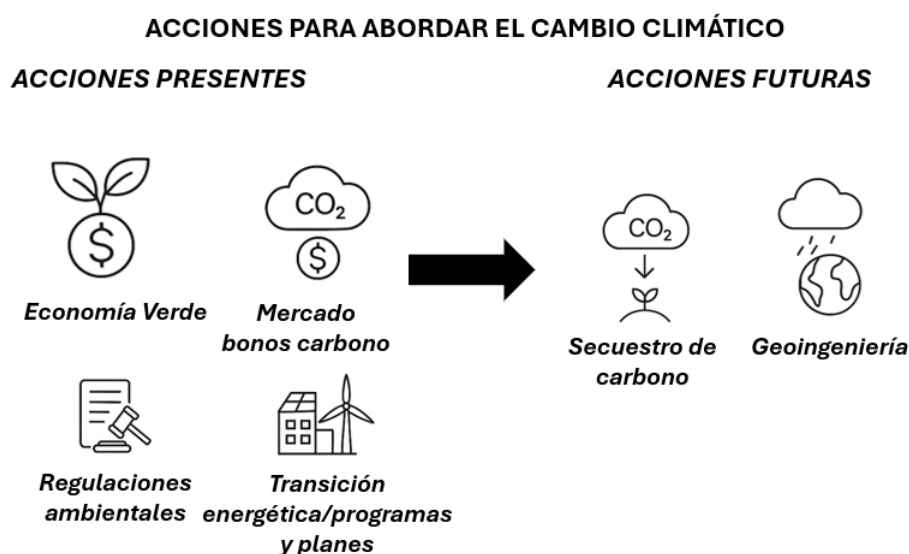


Figura. 4 Acciones presentes y futuras para abordar el cambio climático. Elaboración propia.

Educación para el cambio climático. Como medida para la concientización del problema de las nuevas generaciones, y también como resultado de las reuniones del grupo IPCC (Protocolo de Kioto, 1997; Acuerdo de París 2015; UNESCO y UNFCCC, 2016), se establece la importancia de la educación para modificar los hábitos a largo plazo y el fomento de una mejor comprensión y capacitación para tratar este fenómeno y sus efectos asociados; se explica que la educación es una herramienta fundamental para la reducción de los efectos del cambio climático. Marote & Olcina (2023) en un estudio sobre cambio climático y educación concluye que se ha podido comprobar que, con el paso de los años, la enseñanza de este fenómeno ha ido cobrando protagonismo, con un mayor detalle de medidas concretas en el ámbito español y en las actuaciones de las administraciones regionales. Acciones particulares se ha realizado en Uruguay a través de Dirección Nacional de Educación que ha desarrollado un programa de Educación para el Cambio Climático para alumnos de secundaria; los resultados mostraron que las actitudes hacia la problemática mejoraron y los alumnos desarrollan más hábitos de mitigación y mayor conciencia e interés en aplicarlos a futuro (Garbarino Mendiondo, P. A., 2023). Argentina de igual forma ha implementado acciones para la educación ambiental; a través del Ministerio de Educación y el Consejo Federal de Educación fundamentados en la Ley de Educación Ambiental Integral (Argentina.gov.ar. 2022). En México desde 1992, se instituyeron diversas acciones tales como la creación del Sistema Nacional de Cambio Climático como consecuencia de la Ley General de Cambio Climático del 2012. De aquí se derivan diversos lineamientos para comisiones y secretarías de estado, incluidas la secretaria de Educación Pública. Se instituye el Consejo Nacional de Fomento Educativo, Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente, emprendiendo acciones para promover la cultura de reforestación; se promueve la creación de Centros de Capacitación para el Desarrollo Sustentable (1994), asimismo en 2012 se crea el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (Lara Arzate, J., 2021). Ya en la última década se implementaron programas de educación superior y de posgrado en energías

limpias y renovables en universidades tales como la UNAM, y diversas Universidades Tecnológicas y universidades privadas.

Economía verde y mercado de bonos de carbono

De acuerdo con el PNUMA, la economía verde se refiere a una economía baja en carbono, eficiente en recursos y socialmente inclusiva, en el contexto de desarrollo sostenible y erradicación de la pobreza, que cubre los sectores de turismo, agricultura, transporte, vivienda, pesca, energía, agua, residuos y uso de la tierra. No es nada nuevo, simplemente se trata de un modelo económico para despertar conciencia para lograr el bienestar de todos y respetando el medio ambiente (Markandya, A., Barbier, E. 1989). Países como Barbados, Colombia, Haití, Jamaica, México, Perú, Santa Lucía, y Uruguay realizan estudios para la implementación de acciones. Los temas que incluye son: Economía circular, Cultura empresarial, compras responsables, infraestructura verde, agricultura sostenible, economía colaborativa, captura y reciclaje de carbono y revolución de las energías renovables locales. (ONU Programa para el Medio Ambiente, 2019). Este concepto, no parece ser una solución de gran impacto a corto plazo debido a la lentitud del proceso; la inversión de capital es alta para lograr que los productos sean respetuosos con el medio ambiente; es un tema de conciencia ecológica, que es superado por la necesidad de incrementar la riqueza y que puede ser abordado desde la perspectiva de educación ambiental.

Por su parte el tema de bonos de carbono, que se puede asociar a la línea de economía verde, surge desde el marco del Protocolo de Kioto, como mecanismo para el intercambio emisiones de GEI basada en la compra y venta de permisos para emitir CO₂. Es un sistema de comercio a través del cual los gobiernos, las empresas o bien los individuos pueden adquirir o vender unidades de reducción de emisiones para cumplir con sus obligaciones actuales y futuras. Existen dos vertientes de este mercado, de cumplimiento regulado y voluntario, el primero mueve anualmente más de \$ 875,000 millones de dólares (MDD) y el segundo sobre \$ 2,000 MDD. En México existe 259 proyectos activos, de los cuales 146 finalizaron el registro y hay 113 listados (Avila, J. 20024). Actualmente 42 gobiernos nacionales y 25 gobiernos subnacionales han fijado un precio al carbono. También se ha determinado que se requieren otros \$ 7000 millones de dólares al año para 2030 para financiar la transición hacia económicas de bajos niveles de carbono (Grupo Banco Mundial, 2017). Para 2021, los proyectos con mayor demanda de transacciones fueron los proyectos forestales y de uso de la tierra, que en montos representaron el 67% del mercado de los bonos de carbono en 2021; también los proyectos de energías renovables tuvieron un incremento y en contraste, los proyectos de eficiencia energética y de proyectos domésticos y comunitarios tuvieron baja demanda (Climate Trade, 2022).

Programas de transición energética

La implementación de los programas y acciones para la transición energética y la mitigación del cambio climático dependen de las políticas y decisiones de los países (IRENA, 2021). El análisis de IRENA, indica que más del 90% de las soluciones que darán resultados exitosos para 2050 estarán relacionados con las energías renovables a través del suministro directo, la electrificación, la eficiencia energética, el hidrógeno verde y la bioenergía combinada con la captura y el almacenamiento de carbón. Sin embargo, llevar las tecnologías de transición energética a la velocidad y niveles necesarios, para tener resultados en 2030 y luego en 2050 se requiere políticas y medidas específicas, siendo una de ellas y de las más importantes la inversión de recursos financieros, que tendrá que aumentar en un 30% con respecto a la inversión planificada (un total de 131 billones de dólares estadounidenses) de aquí a 2050.

Para cumplir con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura global a 1.5 °C, los niveles de despliegue de las energías renovables deben aumentar de los 3,000 gigavatios (GW) se tiene hoy en día a más de 10,000 gigavatios (GW) para el año 2030, lo que supone un promedio de 1,000 gigavatios (GW) anuales. Este despliegue está limitado a ciertas regiones del mundo, las más contaminantes que saber son China, Estados Unidos y la Unión Europea, las cuales representaron dos tercios de toda la nueva potencia instalada en el año 2022, lo que supone una gran diferencia con los demás países en materia de desarrollo (Ambientum, 2023).

Impuestos ambientales

Los impuestos ambientales son aquellos destinados a gravar los comportamientos nocivos para la salud del planeta, esto es, quien contamina debe pagar. Se trata de una de las medidas más sencillas en política pública para contribuir a

las metas de reducciones de emisiones, al establecer un costo por cada tonelada de CO₂e a⁻¹ contenida en los combustibles fósiles o directamente emitida hacia la atmósfera. El FMI ha propuesto que los países más contaminantes establezcan un impuesto sobre las emisiones de CO₂, y tendría que ser de 75 dólares por tonelada en 2030 para los países más ricos (Ámbito, 2021). En México, a partir de 2021 se iniciaron acciones para el cobro de impuestos por emisión de cada tonelada CO₂, a la fecha 14 entidades están sujetas a esta disposición amparada en la Ley General de Equilibrio y Protección del Medio Ambiente, fuentes fijas, móviles, de área y naturales. Ahora el tema no es económico, el tema es ambiental y se debe reducir emisiones para no pagar impuestos (Economics, 2024). Por su parte, a partir de 2018 Argentina implementó impuestos ambientales a emisiones, definiendo dos cuotas, una para combustibles, una para combustibles líquidos (gasóleo, kerosene, diésel, otros) y otra para combustibles fósiles (combustóleo, coque de petróleo, carbón mineral, otros). Para 2022, Argentina tuvo una recaudación anual de \$ 2,368.2 MDD.

Aunque diversos países tienen impuestos ambientales, los más relevantes son Alemania y Australia que lideran con 6 tipo de ellos, seguido de Chile con cinco, Estados Unidos con cuatro y México con tres. Los tipos de impuestos son por emisiones de CO₂ por actividades industriales, transporte y consumo energético, impuestos sobre automóviles nuevos, impuestos al carbono, impuestos sobre plaguicidas y manejo por tierra y recursos naturales.

Geoingeniería

En las últimas décadas se ha fortalecido la idea de mitigar el cambio climático a través de la manipulación y control de clima, lo que se conoce como geoingeniería. Este concepto debe cumplir al menos dos características fundamentales: deben ser intencionales y tener un impacto global o de gran escala (Bala, 2009); Delgado-Ramos, J.A. 2012). Los impulsores de este concepto la consideran una solución técnica a la crisis climática, para cumplir los objetivos del acuerdo de París de 2015 y a la vez mantener un estilo de vida de alto consumo, sin bajar los consumos de energía. La concepción de la geoingeniería, aun con riegos no dimensionados, desvía los esfuerzos que se realizan para reducir las emisiones de carbono, por método probado tales como el uso de las energías renovables. El concepto considera tres tecnologías, el manejo de la radiación solar (SMR) y la captura y almacenamiento de del carbono (CDR), y la fertilización oceánica.

Las tecnologías SRM tienen como objetivo reducir la cantidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre (Gailhofer et al., 2023), lo que se puede hacer a través de diversos enfoques, tales como la inyección de partículas reflectantes en la atmósfera superior o el despliegue de espejos o superficies reflectantes en el espacio. El objetivo es reducir la cantidad de energía solar cautivada por la Tierra y potencialmente enfriar el planeta (National Academic of Sciences & Medicine, 2021).

Por su parte, la Tecnologías de eliminación de captura y almacenamiento de carbono (CDR), aspiran a extraer dióxido de carbono de la atmósfera y secuestrarla en diversos yacimientos, como formaciones geológicas, océanos o bosques. CDR se puede lograr a través de una serie de métodos, incluyendo la aforestación que no es más que crear bosques en tierras donde históricamente no ha habido, y la captura directa de CO₂ contenido en el aire, la cual puede ser por Captura Directa de Carbono, DAC; o por Captura de Carbono, Uso y Almacenaje, CCUS.

El método es la captura directa del CO₂ del aire (DAC) consiste en utilizar grandes ventiladores para succionar el aire ambiente, que se hace pasar por un disolvente líquido o sorbente sólido para separar el CO₂ de otros gases. El CO₂ capturado se puede utilizar directamente para el sector de las bebidas o para producir agregados o combustibles sintéticos, o bien almacenarse geológicamente (Do Better by ESADE, 2020). DAC es diferente de CCUS, dado que éste último toma aire contaminado directamente de fuentes fijas de emisiones a gran escala.

El otro método es fertilización oceánica, o alcalinización que consiste en agregar materiales alcalinos al océano, como rocas de silicato o carbonato, para aumentar la cantidad de CO₂ que absorbe. De manera similar, la fertilización del océano implicaría estimular el crecimiento de fitoplancton para mejorar el secuestro de carbono. Estas técnicas cuyas validaciones técnicas y económicas están en estudio, pueden resultar arriesgadas, pero es una necesidad urgente remover CO₂ del aire.

La Bioenergía con Captura y Almacenamiento de Carbono (BECCS por sus siglas en inglés), es otra de la tecnologías de la geoingeniería, que consiste básicamente en quemar biomasa para generar energía, con la posterior captura de las

emisiones de carbono resultantes, las cuales se bombean a gran profundidad, almacenándose permanentemente en depósitos naturales. Debido a que las especies vegetales absorben CO₂ a medida que crecen, esta es una forma de eliminar el CO₂ de la atmósfera. La idea toma sus bases en propuesta viejas de siembra de árboles de rápido crecimiento, y que ahora pueden ser genéticamente modificados para lograr mayor absorción de CO₂ que pueden derivar en la producción de combustibles de segunda y tercera generación.

Sumideros de CO₂ y tecnologías de emisiones negativas

En términos simples, un sumidero es un almacén de carbono procedente de la atmósfera. Se trata de sistemas naturales que absorben (emisiones negativas) y almacena permanentemente más carbón de la atmósfera, del que se está emitiendo (emisión positiva). Un caso de estudio es la degradación de suelos agrícolas, pecuarios, forestales y pastoriles que pierden carbono por la actividad intensiva de explotación, bajando su fertilidad. Entonces para recupera el carbono perdido, se realizan actividades de reconversión lo que se hace a través prácticas agrícolas de conservación del suelo que reducen las pérdidas y almaceno carbón la biomasa de las plantas y el suelo. Con esto se logran dos objetivos, secuestrar el carbono y recuperar la fertilidad de los suelos. También se utilizan prácticas como la aforestación y reforestación, cuyos suelos son los mayores sumideros de carbono; aplica también a los océanos (FAO Portal Suelo, SF). Asociado a los sumideros, están las Tecnologías de Emisiones Negativas, NET, donde la de mayor potencial es la Bioenergía con Captura y Almacenamiento de Carbono (BECCS) ya descrito. Otra tecnología NET es la captura directa de aire (DAC), donde un proceso químico extrae CO₂ del aire (Comisión Europea. 2020).

El concepto de sumidero de CO₂ y las tecnologías de emisiones negativas también se asocian al concepto de neutralidad climática, donde se elimina el CO₂ mediante absorción natural del planeta logrando que las emisiones sean iguales o menores a las que se eliminan; también denominado huella cero de carbono. Este concepto es más amplio que la eliminación del CO₂, y considera la eliminación de gases como el óxido nitroso, el metano, los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre (Crespo Garay, C. 2024).

Electromovilidad.

El 23 % de las emisiones globales contaminantes corresponde al transporte para movimiento de personas y transporte de mercancías (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2023). Según las Naciones Unidas, para el año 2050 el transporte será el mayor responsable del crecimiento de emisiones de carbono, que representa el 70% de estas. Ante esta situación, existen soluciones factibles frente a una problemática real y se ha propuesto a la electromovilidad como una alternativa amigable y sostenible de transporte, además de las bicicletas y otros medios que no requieren combustibles fósiles (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. 2024). La perspectiva es que para 2030, el 50% de los vehículos sean eléctricos, la meta se replantea para 2035; la oferta de vehículos ha avanzado más rápido que la demanda. El futuro de la electromovilidad se ve prometedor siempre y cuando se cumplan las siguientes premisas: Bajar costos de fabricación, incrementar la autonomía, y desarrollar suficientes redes de carga.

Según The World Transitions Outlook 2022 elaborado por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), estima que el despliegue de automóviles eléctricos generará una reducción de 1.6 millones de barriles de crudo por día (mb/d) para 2025 y 4.6 mb/d para 2030. En términos de cambio climático, los automóviles eléctricos lograrán una reducción neta de emisiones de GEI de casi 580 Mton CO₂e (Murrieta Cummnings, C. 2023).

Tecnologías para hidrógeno verde.

En los últimos años se ha retomado el principio básico de electrolisis para producir hidrógeno a partir de energía proveniente de fuentes renovables. El concepto es simple, generar energía eléctrica por electrolisis de una solución de agua, obteniendo H y O₂; el hidrógeno se almacena y puede ser utilizando posteriormente; a este combustible, se la llama hidrógeno verde. Esto resuelve la problemática de almacenaje de energía eléctrica en baterías o en depósitos térmicos; la única problemática por ahora es el almacenaje seguro, dado que se trata del elemento químico con el menor número atómico y con alto poder calorífico. El hidrógeno se difunde gradualmente en cualquier material de construcción, es altamente volátil. Una forma de almacenajes es por sorción, donde el hidrogeno queda donde se fija químicamente tales como zeolitas o líquidos iónicos.

De acuerdo con la proyección de IRENA (2023) en 2050, el 94 % del hidrógeno procedería de fuentes renovables en el escenario de 1.5 °C. El hidrógeno desempeñaría un papel clave en la descarbonización de los usos finales y la flexibilidad del sistema eléctrico.

Discusión

La tendencia de crecimiento poblacional a nivel mundial muestra que seguirá creciendo y para 2050 habrá sobre 9,500 millones de personas en el planeta que representarían sobre 40,850 millones de toneladas de CO₂e en base a 4.3 ton per cápita. El concepto de mantener el mismo ritmo de crecimiento económico y nivel de bienestar humano, a consta del uso de energía convencional no modificará los patrones de generación de emisiones contaminantes el cual está directamente ligado al consumo energético per cápita. El ritmo de sustitución de energía fósil por energía limpia es alarmantemente bajo, por lo que lograr las metas de reducción de emisiones para evitar superar el incremento 1.5 °C para 2030 es casi imposible. Para lograr una reducción substancial de emisiones contaminantes a estos momentos, se tendría que suprimir la actividad humana de al menos 4,500 millones de personas. El nivel de presencia de las fuentes renovables es bajo, y su contrapeso es la existencia probada de reservas mundiales de combustibles fósiles que le dan una esperanza de vida de 50 años y lo que contrapone en todo sentido a las metas de reducción de uso de estos combustibles. Diversos países tienen su economía basada en los combustibles fósiles, por lo que la transición no será factible a menos que se creen mecanismos de presión internacional para la transición.

Conclusiones

En este momento no existe una evidencia clara de acciones concretas para detener los efectos del cambio climático, por la sustitución de energías contaminantes por no contaminantes. Los resultados que se han tenido desde 1992 cuando se reconoció el tema de contaminación por la actividad antropogénica, solamente ha permitido probar la viabilidad económica de las fuentes limpias de energías, pero no ha logrado superar las barreras de beneficios ambientales soportado esto por el escaso interés de los gobiernos para subsidiar estas tecnologías o soportar desarrollos tecnológicos locales. Las acciones y nuevas tecnologías en conceptualización en etapas de desarrollo aun tendrán un tiempo de espera con resultados de mediano y largo plazo; mientras tanto el destino nos alcanzara después de 2030 cuando se tendrán que implementar medidas desesperadas. Mientras tanto los cambios en el clima seguirán acrecentando los periodos de sequía, los huracanes, los incrementos de temperaturas y otros desastres asociados.

Bibliografía

- Ambientum Portal Ambiental. (2023). Perspectivas de la transición energética mundial en 2023. Ambientum. <https://www.ambientum.com/ambientum/energia/perspectivas-transicion-energetica-mundial-en-2023.asp>
- Ámbito. (2021). El FMI insta a los países más contaminantes a fijar un precio mínimo al carbono. Ámbito. <https://www.ambito.com/informacion-general/fmi/el-insta-los-paises-mas-contaminantes-fijar-un-precio-minimo-al-carbonon5204467>
- Arenales, J. V. (2023, 18 de enero). Estos fueron los recursos que necesitó el planeta para generar la energía en 2022. La República Energía Colombia. <https://www.larepublica.co/globoeconomia/fuentes-de-energia-en-el-planeta-3717776>
- Arenales, J. V. (2023). Estos fueron los recursos que necesitó el planeta para generar la energía en 2022. La República Energía Colombia. <https://www.larepublica.co/globoeconomia/fuentes-de-energia-en-el-planeta-3717776>
- Argentina.gob.ar. (2022). Ley de educación ambiental integral. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/educacion-ambiental/ley-de-educacionambiental>
- Argentina.gob.ar. (2022). Ley de educación ambiental integral. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/educacion-ambiental/ley-de-educacionambiental>
- Avila, J. (2024, 25 de abril). México tiene oportunidad de atraer inversiones mediante mercado de carbono. Expansión. <https://expansion.mx/mercados/2024/04/25/que-es-mercado-carbono-mexico>
- Avila, J. (2024). México tiene oportunidad de atraer inversiones mediante mercado de carbono. Expansión. <https://expansion.mx/mercados/2024/04/25/que-es-mercado-carbono-mexico>
- Bala, G. (2009). Problems with geoengineering schemes to combat climate change. *Current Science*, 96(1), 41–48. <https://www.jstor.org/stable/24104726>
- Bala, G. (2009). Problems with geoengineering schemes to combat climate change. *Current Science*, 96(1), 41–48. <https://www.jstor.org/stable/24104726>
- Barbier, E. B., & Markandya, A. (2013). *A new blueprint for a green economy*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203097298>
- Barbier, E. B., & Markandya, A. (2013). *A new blueprint for a green economy*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203097298>
- BBC News Mundo. (2021, 17 de mayo). Los gráficos que muestran que más del 50% de las emisiones de CO₂ ocurrieron en los últimos 30 años. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-57125710>
- BBC News Mundo. (2021). Los gráficos que muestran que más del 50% de las emisiones de CO₂ ocurrieron en los últimos 30 años. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-57125710>

- ClimateTrade. (2022, 14 de diciembre). El valor del mercado voluntario de carbono supera los 2 mil millones de dólares. ClimateTrade. <https://climatetrade.com/es/el-valor-del-mercado-voluntario-de-carbono-supera-los-2-mil-millones-de-dolares/>
- ClimateTrade. (2022). El valor del mercado voluntario de carbono supera los 2 mil millones de dólares. ClimateTrade. <https://climatetrade.com/es/el-valor-del-mercado-voluntario-de-carbono-supera-los-2-mil-millones-de-dolares/>
- Comisión Europea. (2020, 9 de noviembre). Tecnologías y prácticas de emisiones negativas: El camino a seguir. CORDIS. <https://cordis.europa.eu/article/id/448423-negative-emissions-technologies-and-practices-the-way-forward/es>
- Comisión Europea. (2020). Tecnologías y prácticas de emisiones negativas: El camino a seguir. CORDIS. <https://cordis.europa.eu/article/id/448423-negative-emissions-technologies-and-practices-the-way-forward/es>
- Crespo Garay, C. (2024, 12 de abril). Rumbo a la neutralidad climática en 2050: ¿Qué es la huella cero de carbono? National Geographic España. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/rumbo-neutralidad-climatica-2050-que-es-huella-cero-carbono_20392
- Crespo Garay, C. (2024). Rumbo a la neutralidad climática en 2050: ¿Qué es la huella cero de carbono? National Geographic España. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/rumbo-neutralidad-climatica-2050-que-es-huella-cero-carbono_20392
- Delgado Ramos, G. C. (2012). Geoingeniería, apuesta incierta frente al cambio climático. *Estudios Sociales (Hermosillo, Son.)*, 20(40), 213–236. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-45572012000200008
- Delgado Ramos, G. C. (2012). Geoingeniería, apuesta incierta frente al cambio climático. *Estudios Sociales (Hermosillo, Son.)*, 20(40), 213–236. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-45572012000200008
- Do Better by Esade. (2020, 30 de septiembre). Tecnologías para la transición energética: Captura directa de aire. Esade. <https://dobetter.esade.edu/es/capturadirecta-aire>
- Do Better by Esade. (2020). Tecnologías para la transición energética: Captura directa de aire. Esade. <https://dobetter.esade.edu/es/capturadirecta-aire>
- Economis. (2024). Cómo se aplica el impuesto al carbono en Argentina y para qué se utiliza. *Economis*. <https://economis.com.ar/como-se-aplica-el-impuesto-al-carbono-en-argentina-y-para-que-se-utiliza/>
- FAO. (s. f.). Secuestro de carbono en el suelo. Portal de Suelos de la FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/secuestro-de-carbono-en-el-suelo/es/>
- Forbes Staff. (2023). Así es como las energías limpias ayudaron a frenar el crecimiento de emisiones de CO₂ en 2023. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx>
- Gailhofer, P., Krebs, D., Proelss, A., Schmalenbach, K., & Verheyen, R. (2023). Corporate liability for transboundary environmental harm: An international and transnational perspective (p. 640). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-13264-3>
- Garbarino Mendiondo, P. A. (2022). La educación para el cambio climático como herramienta de mitigación. *MLS Educational Research (MLSER)*. <https://www.mlsjournals.com/Educational-Research-Journal/article/view/1015/1627>
- Georgieva, K. (2022). Retomar la senda de las emisiones netas cero: Tres prioridades fundamentales para la COP27. IMF Blog. <https://www.imf.org/es/Blogs/Articles/2022/11/04/getting-back-on-track-to-net-zero-three-critical-priorities-for-cop27>
- Global Carbon Project. (2021). Resumen general. IPCC. https://archive.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assessments/Spanish/ipcc_90_92_assessments_far_overview_sp.pdf
- Grupo Banco Mundial. (2017). Fijación del precio del carbono. Informe: Situación y tendencias de la fijación del precio al carbono. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2022/05/24/global-carbon-pricing-generates-record-84-billion-in-revenue>
- IRENA. (2021). Perspectivas de la transición energética mundial: Camino de 1.5 °C. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_WETO_Summary_2021_ES.pdf
- Lara Arzate, J. (2021). Los retos de la educación ambiental en México. SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat%7Ceducacionambiental/articulos/los-retos-de-la-educacion-ambiental-en-mexico>
- Martín de la Plaza, I. (2021). Energía y desigualdad, un matrimonio muy bien avenido. BBVA OpenMind. <https://www.bbvaopenmind.com/economia/economia-global/energia-y-desigualdad/>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2023). Perspectivas del transporte del ITF 2023. *Latitud 435 Noticias*. <https://latitud435.com/2020/12/infografiaemisiones-globales-de-gases-de-efecto-invernadero-por-sector/>
- Morote, A. F., & Olcina, J. (2023). Cambio climático y educación. Una revisión de la documentación oficial. *Documents d'anàlisi geogràfica*, 69(1), 107–134. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.749>
- Murrieta Cummings, C. (2023). Transición energética hacia 2023. *Energía Hoy*. <https://energiahoy.com>
- Naciones Unidas México. (2023). Estado de la población mundial 2023: 8.000 millones de vidas, infinitas posibilidades. Naciones Unidas. <https://mexico.un.org>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). Reflecting sunlight: Recommendations for solar geoengineering research and research governance. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25762>
- ONU Programa para el Medio Ambiente. (2019). Economía verde. UNEP. <https://www.unep.org/es/regiones/americ-latina-y-el-caribe/iniciativas-regionales/promoviendo-la-eficiencia-de-recursos-1>
- Pacto Mundial Red España. (2023). COP28: El inicio del fin de los combustibles fósiles. Principales conclusiones. Pacto Mundial de la ONU. <https://www.pactomundial.org/noticia/cop28-el-inicio-del-fin-de-los-combustibles-fosiles>
- Radar Energético. (2023). Los combustibles fósiles aún representan el 82% del consumo mundial de energía primaria. Radar Energético. <https://www.radarenergetico.com/los-combustibles-fosiles-aun-representan-el-82-del-consumo-mundial-de-energia-primaria>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2024). CO₂ emissions: How much CO₂ does the world emit? Which countries emit the most? *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/team/hannah-ritchie>
- Serrano, A. (2022). COP27 y ciudades: La urgencia de la adaptación frente al cambio climático. Sistema Digital, Políticas de la Tierra.
- Serrano, A. (2022). COP27 y ciudades: La urgencia de la adaptación frente al cambio climático. Sistema Digital, Políticas de la Tierra.
- Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (2024). La electromovilidad, una oportunidad para hacer frente al cambio climático. Desde Adentro. <https://www.desdeadentro.pe/2021/10/la-electromovilidad-una-oportunidad-para-hacer-frente-al-cambio-climatico>
- World Bank. (2023). Emisiones de CO₂ (toneladas métricas per cápita). World Bank Data. <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>
- World Meteorological Organization. (2023). WMO global annual to decadal climate update. WMO. <https://public.wmo.int>