



Universidad César Vallejo

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Estrategias Alternativas para la Mitigación del Cambio
Climático: Una Revisión Sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniera ambiental

AUTORA:

Carazas Velaysosa, Marilyn Yuleisi (ORCID: 0000-0001-5467-7859)

ASESOR:

Mgr. Garzon Flores, Alcides (ORCID: 0000-0002-0218-8743)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de Recursos Naturales

LIMA – PERÚ

2022

Dedicatoria

A mis padres, que con todo su amor y sacrificio me impulsaron a llegar donde estoy, a mis hermanos por su apoyo incondicional en todo momento. Por fomentar en mí la gana de seguir superándome día a día.

Agradecimiento

A mi padre Wilfredo Carazas Huaman que fue mi motivación en todo momento desde el día que partió, a mi madre Rosy Velaysosa Rojas por todos sus sacrificios, a mis hermanos, y a todas las personas que han estado conmigo en todo este proceso.

A mi tutor por el tiempo dedicado y los conocimientos brindados y sobre todo a Dios por todas sus bendiciones.

Índice de contenidos

Carátula	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de gráficos	v
Resumen	vi
Abstract	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	12
3.1. Tipo y diseño de investigación	12
3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística	14
3.3. Escenario de estudio	16
3.4. Participantes	16
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	16
3.6. Procedimientos	16
3.7. Rigor científico	18
3.8. Método de análisis de información	18
3.9. Aspectos éticos	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
4.1 Tecnologías de mitigación convencionales	19
4.2 Tecnologías de emisiones negativas	25
4.3 Tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiativo	40
V. CONCLUSIONES	45
VI. RECOMENDACIONES	46
REFERENCIAS	47

Índice de figuras

Figura Nº 1	Análisis bibliométrico de la investigación sobre la mitigación del cambio climático: un mapa de visualización de red y un mapa de b, que muestra el estado reciente de la investigación científica sobre el tema de la mitigación del cambio climático destacando tendencias y lagunas en la literatura durante 5 años entre 2015 y 2020	17
Figura Nº 2	Principales tecnologías de descarbonización que se centran en la reducción de las emisiones de CO ₂ relacionadas con la oferta y la demanda de energía.	19
Figura Nº 3	Principales tecnologías y técnicas de emisiones negativas que se implementan para capturar y secuestrar carbono de la atmósfera.	26
Figura Nº 4	Principales tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiativo que tienen como objetivo alterar el presupuesto de energía radiativa de la tierra para estabilizar o reducir las temperaturas globales	40

Resumen

Hasta ahora, las actividades antropogénicas han causado alrededor de 1,0 °C de calentamiento global por encima del nivel preindustrial y es probable que alcance los 1,5 °C entre 2030 y 2052 si persisten las tasas de emisión actuales. En 2018, el mundo encontró 315 casos de desastres naturales que están relacionados principalmente con el clima. Aproximadamente 68,5 millones de personas se vieron afectadas y las pérdidas económicas ascendieron a \$ 131,7 mil millones, de los cuales tormentas, inundaciones, incendios forestales y sequías representaron aproximadamente el 93%. Las pérdidas económicas atribuidas a los incendios forestales solo en 2018 son casi iguales a las pérdidas colectivas de los incendios forestales sufridas durante la última década, lo cual es bastante alarmante. Además, la alimentación, el agua, la salud, el ecosistema, el hábitat humano y la infraestructura han sido identificados como los sectores más vulnerables al ataque climático. Esta investigación revisa las principales estrategias para la reducción del cambio climático, a saber, la mitigación convencional, las emisiones negativas y la geoingeniería de forzamiento radiactivo. Las tecnologías de mitigación convencionales se centran en reducir las emisiones de CO₂ de origen fósil. Las tecnologías de emisiones negativas tienen como objetivo capturar y secuestrar el carbono atmosférico para reducir los niveles de dióxido de carbono. Finalmente, las técnicas de geoingeniería de forzamiento radiactivo alteran el presupuesto de energía radiactiva de la tierra para estabilizar o reducir las temperaturas globales. Es evidente que los esfuerzos de mitigación convencionales por sí solos no son suficientes para cumplir con los objetivos estipulados por el acuerdo de París; por lo tanto, la utilización de rutas alternativas parece inevitable. Si bien es posible que varias de las tecnologías presentadas se encuentren aún en una etapa temprana de desarrollo, las técnicas de secuestro de base biogénica están hasta cierto punto maduras y pueden implementarse de inmediato.

Palabras clave: Eliminación de dióxido de carbono, Mitigación del cambio climático, Tecnologías de descarbonización, Tecnologías de emisiones negativas, Tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiactivo.

Abstract

So far, anthropogenic activities have caused about 1.0 °C global warming above the pre-industrial level and are likely to reach 1.5 °C between 2030 and 2052 if current emission rates persist. In 2018, the world found 315 cases of natural disasters that are mainly related to climate. Approximately 68.5 million people were affected, and economic losses amounted to \$131.7 billion, of which storms, floods, forest fires and droughts accounted for approximately 93%. The economic losses attributed to forest fires in 2018 alone are almost equal to the collective losses of forest fires suffered during the last decade, which is quite alarming. In addition, food, water, health, ecosystem, human habitat, and infrastructure have been identified as the sectors most vulnerable to climate attack. This research reviews the main strategies for reducing climate change, namely conventional mitigation, negative emissions, and radiative forcing geoengineering. Conventional mitigation technologies focus on reducing fossil CO₂ emissions. Negative emission technologies aim to capture and sequester atmospheric carbon to reduce carbon dioxide levels. Finally, radiative forcing geoengineering techniques alter the Earth's radiative energy budget to stabilize or reduce global temperatures. Conventional mitigation efforts alone are not sufficient to meet the targets set by the Paris agreement; therefore, the use of alternative routes seems inevitable. While several of the technologies presented may still be at an early stage of development, biogenic-based sequestration techniques are to some extent mature and can be implemented immediately.

Keywords: Climate change mitigation, Negative emissions technologies, Carbon dioxide removal, Decarbonization technologies, Radiative forcing geoengineering technologies.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático plantea graves amenazas para la salud y el bienestar humanos, y contribuye a aumentar las desigualdades en materia de salud entre los países y dentro de ellos (Edenhofer et al. 2014). Los impactos del cambio climático en la salud pueden ser directos (por ejemplo, olas de calor, clima extremo y eventos como tormentas, incendios forestales, inundaciones o sequías) o indirectos a través de los efectos del cambio climático en los ecosistemas (por ejemplo, pérdidas agrícolas, cambios en los patrones de distribución de enfermedades, interrupciones de la infraestructura) y en la economía y las estructuras sociales (por ejemplo, migración y conflicto)(Yue y Gao 2018).

Los problemas climáticos están relacionados con el futuro de la humanidad. Los cambios en los patrones climáticos amenazarán el rendimiento de los cereales, el aumento del nivel del mar provocará inundaciones catastróficas y los climas extremos, como ventiscas, lluvias torrenciales, sequías, granizo y tifones, se producirán con frecuencia en toda la Tierra (Yue y Gao 2018).

El aumento de las emisiones de CO₂ fósil en 2018 se debe principalmente a una mayor demanda de energía. Además, las emisiones relacionadas con el cambio de uso del suelo ascendieron a 3,5 GtCO₂ en 2018 (PNUMA 2019). Juntas, en 2018, las emisiones de CO₂ de origen fósil y relacionadas con el uso de la tierra representaron aproximadamente el 74 % de las emisiones globales totales de gases de efecto invernadero.

Metano (CH₄), otro importante gas de efecto invernadero, tuvo un aumento de la tasa de emisión del 1,7 % en 2018 en comparación con un aumento anual del 1,3 % durante la última década. Óxido nitroso (N₂O), que están influenciadas principalmente por las actividades agrícolas e industriales, aumentaron un 0,8 % en 2018 en comparación con un aumento anual del 1 % en la última década. Sin embargo, se observó un aumento significativo en los gases fluorados durante 2018 del 6,1 % en

comparación con un aumento anual del 4,6 % durante la última década (PNUMA 2019).

Para poner estos números en perspectiva, un informe reciente del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) demostró que las actividades antropogénicas hasta ahora han causado un calentamiento global estimado de 1,0 °C por encima del nivel preindustrial, especificando un rango probable entre 0,8 y 1,2 ° C (IPCC 2018).

Existe una relación interna inevitable entre el cambio climático y la auditoría ambiental. Servir para mejorar el clima es la tendencia y elección inevitable del desarrollo de la auditoría ambiental. Las auditorías ambientales son un requisito ineludible para revisar y evaluar el ejercicio del poder, la asignación de recursos públicos, el mejoramiento del entorno de vida y la expansión de la capacidad de carga ambiental (Bustreo et al. 2019).

Acelerar el desarrollo de nuevas tecnologías bajas en carbono y promover su aplicación global son desafíos clave para estabilizar las emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI). En consecuencia, la tecnología está en el centro de las discusiones actuales en torno al régimen climático posterior a Kyoto (Ricke, Millar y MacMartin 2017).

Las principales técnicas de emisiones negativas ampliamente discutidas en la literatura incluyen captura y almacenamiento de carbono bioenergético, biocarbón, meteorización mejorada, captura y almacenamiento directo de carbono en el aire, fertilización oceánica, aumento de la alcalinidad del océano, secuestro de carbono en el suelo, forestación y reforestación, construcción y restauración de humedales, así como así como métodos alternativos de utilización y almacenamiento de emisiones negativas, como la carbonatación mineral y el uso de biomasa en la construcción (Goglio et al. 2020).

Tales técnicas se denominan tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiactivo, y el objetivo principal es la estabilización o reducción de la temperatura. A diferencia de las tecnologías de emisiones negativas, esto se logra sin alterar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Las principales técnicas de geoingeniería de forzamiento radiactivo que se analizan en la literatura incluyen la inyección de aerosoles estratosféricos, el aclaramiento del cielo marino, el adelgazamiento de cirros, los espejos espaciales, el aclaramiento basado en la superficie y varias técnicas de gestión de la radiación (Lockley, Mi y Coffman 2019).

Sobre la base de realidad problemática presentada se planteó el problema general y los problemas específicos de la investigación. El problema general de la investigación fue ¿Qué estrategias alternativas para la mitigación del cambio climático están tomando importancia en la actualidad? Los problemas específicos de la investigación fueron los siguientes:

- **PE1:** ¿Cuáles son las tecnologías de mitigación al cambio climático convencionales?
- **PE2:** ¿En qué consisten las tecnologías de emisiones negativas?
- **PE3:** ¿Qué se sabe sobre las tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiativo?

El objetivo general fue Revisar estrategias alternativas para la mitigación del cambio climático. Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- **OE1:** Analizar las tecnologías de mitigación al cambio climático convencionales.
- **OE2:** Evaluar las tecnologías de emisiones negativas.
- **OE3:** Explicar las tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiativo.

II. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan los antecedentes más relevantes en respuesta a revisar la literatura sobre las estrategias alternativas para la mitigación del cambio climático y cuáles y cómo están tomando importancia en la actualidad.

Gi et al. (2020) evaluaron la contribución potencial de la generación de energía de fusión al desarrollo bajo en carbono, que se prescribe en el Acuerdo de París, bajo la combinación de diferentes incertidumbres del desarrollo socioeconómico futuro, la probabilidad del objetivo de 2 °C y el desarrollo de plantas comerciales de energía de fusión. Se requería una emisión global negativa de CO₂ en 2100 por la descarbonización drástica de los sistemas de energía para lograr el objetivo de 2 °C, y se esperaba que las plantas de energía de fusión se instalaran en la segunda mitad del siglo XXI, principalmente en países con potencial limitado de energía de cero emisiones. rentable mitigación del cambio climático. Si se pudieran desarrollar centrales eléctricas de bajo costo mediante una I+D mejorada y un diseño avanzado en proyectos *DEMONstration Fusion Reactor* o si el establecimiento de plantas de fisión en el futuro es bajo, la generación de energía de fusión también se desplegará en la UE28, India y China. La reducción adicional de costos mediante un diseño innovador y conceptos alternativos también es esencial para las plantas de fusión difusa en países ricos en recursos con cero emisiones.

Ma, Zhang y Tian (2020) diseñaron e implementaron un experimento de liberación poco profunda de fuente puntual de CO₂ para simular la fuga de captura y el almacenamiento de carbono CCS a una velocidad de 1,0 L min⁻¹ y una profundidad de 1,5 m. Se examinó el alcance de las respuestas de cultivos y tierras de cultivo a la fuga de CO₂, centrándose en el trigo de primavera. El sitio experimental tenía un radio de 9,0 m, y se encontró que el CO₂ del suelo 2 hasta 4,0 m de la fuente, o 2,67 veces la profundidad de la fuga. Además, el radio de influencia de la fuga de CO₂ en la altura del trigo de primavera fue de aproximadamente 1,0 m, que era

0,67 veces la profundidad de la fuga. Las características morfológicas del trigo observadas directamente sobre la fuga fueron aproximadamente un 30-50 % más bajas que los niveles de fondo (a 9,0 m de la fuente). CO₂ podría resultar en la degradación del campo de trigo a lo largo de la superficie del suelo. Estos hallazgos sugieren que se debe desarrollar un conjunto de parámetros empíricos para evaluar el alcance de la influencia negativa de la fuga de CCS en la agricultura.

Qin et al. (2020) revisaron el Reformado con CO₂ de CH₄ a gas de síntesis sobre catalizadores a base de níquel, centrándose en el diseño y los factores de control. Discutimos la estructura a microescala del reformado seco de metano (DRM) para superar los cuellos de botella de la rápida deposición de carbono y la fácil sinterización. Presentaron los cuatro factores que controlan la actividad de los catalizadores basados en Ni: 1) promotores, que mejoran la actividad catalítica y reducen la deposición de carbono; 2) soportes que permitan obtener componentes activos altamente dispersos y limitar la sinterización del metal y la deposición de carbono a altas temperaturas; 3) métodos de preparación, que controlan el tamaño de partícula y la dispersión del metal activo; y 4) componentes catalíticos bimetálicos, que mejoran las propiedades de los catalizadores a base de níquel. Proponen el desarrollo de catalizadores basados en Ni para DRM, como una alternativa más económica a los catalizadores de metales nobles.

Pitelis, Vasilakos y Chalvatzis (2020) evaluaron la efectividad de diferentes tipos de políticas de energía renovable (REP) para fomentar la actividad de innovación en el sector eléctrico de la OCDE durante el período 1990-2014. Más específicamente, recopilaron y analizaron datos sobre intervención de políticas, actividad de innovación (recuento de patentes por tipo de tecnología renovable) y desempeño para 21 países de la OCDE desde 1990 hasta 2014. Usando las características específicas de cada política, identificaron todos los REP en su muestra y los clasificaron en uno de tres tipos distintos de políticas: impulso tecnológico, atracción de la demanda e instrumentos de políticas

sistémicas. Los resultados muestran muy claramente que una talla no sirve para todos. Se ha descubierto que la actividad de innovación responde mejor a los instrumentos de política de demanda solo para algunas tecnologías, mientras que, para otras, un enfoque más mixto puede ser más efectivo. Y, a veces, las políticas que están diseñadas para centrarse en una sola tecnología son más eficaces para fomentar la innovación que las de múltiples tecnologías (como en el caso de la energía solar).

Sinsel, Riemke y Hoffmann (2020) en su estudio proporcionan una descripción general completa de los desafíos y las tecnologías de solución entre todos los dominios del sistema de energía. La matriz de interrelación de desafíos y tecnologías de solución desarrollada en este estudio brinda información importante: Primero, las tecnologías de solución varían significativamente en su potencial para resolver ciertos desafíos. Por lo tanto, el potencial de solución de diferentes tecnologías puede ayudar a priorizar tecnologías de solución además de centrarse en opciones rentables. En segundo lugar, es posible identificar grupos de tecnologías de solución que pueden ayudar a mitigar ciertos grupos de desafíos. La categorización desarrollada en este documento ayuda a especificar mejor la necesidad de tecnologías de solución específicas y mejora la transparencia del complejo proceso de integración de energía renovable.

Wang et al. (2020) informan que la carbonatación mineral de yeso de la desulfuración de gases de combustión (FGD) es una tecnología potencial para el secuestro de CO₂, aunque las condiciones de reacción no están realmente optimizadas para producir un producto reciclable. Aquí transformamos yeso, CaSO₄ · 2H₂O, en vaterita, CaCO₃, mediante sonicación. Estudiamos la conversión, las composiciones de fase y las morfologías de los productos de carbonatación y las concentraciones de sulfato (SO₄²⁻) durante la carbonatación. Los resultados muestran que la conversión de CaSO₄ · 2H₂O aumentó de 60 a 98% con la amplitud ultrasónica. Se obtuvo vaterita pura al 50% de amplitud ultrasónica en 30 min. La baja relación Ca²⁺/CO₃²⁻, la alta concentración de SO₄²⁻ y sus

efectos sinérgicos aparecen como factores clave para formar vaterita. En general, los hallazgos revelan la viabilidad de la carbonatación de yeso para producir vaterita de alto valor mediante sonicación.

Se procede a explicar las bases teóricas y conceptos asociados a las tecnologías convencionales de mitigación del cambio climático, las tecnologías de emisiones negativas y las tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiativo; con el fin de esclarecer previamente conceptos para facilitar la comprensión de los resultados.

Este debate se complica por una serie de factores. En particular, las tecnologías respetuosas con el medio ambiente se han desarrollado principalmente en países industrializados, pero se requieren con urgencia para mitigar las emisiones de GEI en economías emergentes de rápido crecimiento. (UNFCCC 2008).

Por lo tanto, garantizar la difusión mundial de estas tecnologías entraña considerables desafíos políticos y económicos porque los países en desarrollo son reacios a asumir todos los costos financieros asociados con su adopción, mientras que las empresas de los países industrializados son reacias a regalar activos intelectuales estratégicos (Organización Meteorológica Mundial 1979).

Esta fue posiblemente la primera conferencia de este tipo en la que se discutieron los efectos adversos del cambio climático. En 1988, la Organización Meteorológica Mundial, en colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), creó el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) para proporcionar a los gobiernos y organismos oficiales conocimientos e información científicos que puedan utilizarse para formular cambios climáticos. políticas relacionadas (IPCC 2013).

La convención establece los compromisos de todas las partes involucradas, asignando responsabilidades importantes a los países

desarrollados para implementar políticas nacionales para limitar las emisiones antropogénicas y mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero.

Además, comprometer a los países desarrollados a ayudar financiera y tecnológicamente a los países en desarrollo vulnerables a tomar medidas climáticas (United Nations 1992). La convención está actualmente ratificada por 197 países (UNCC Secretariat 2019).

Durante la tercera conferencia de las partes de la CMNUCC (COP-3) en 1997, se adoptó el protocolo de Kyoto y entró en vigor en 2005. El protocolo de Kyoto introdujo los compromisos de reducción de emisiones para los países desarrollados por un período de compromiso de cinco años entre 2008 y 2012. El protocolo estableció todas las políticas relacionadas, los sistemas de monitoreo y presentación de informes, e introdujo tres mecanismos basados en el mercado para lograr esos objetivos. El protocolo introdujo dos mecanismos basados en proyectos, un mecanismo de desarrollo limpio y un mecanismo de implementación conjunta.

Además, el protocolo introdujo un mecanismo de comercio de emisiones como plataforma para facilitar el comercio de las emisiones asignadas anualmente que ahorran los miembros del protocolo a aquellas que superan sus límites (UNFCCC 1997).

El protocolo de Kioto define cuatro unidades de reducción de emisiones, cada una de las cuales representa una tonelada métrica de CO₂ equivalente y todas son negociables (CMNUCC 2006).

1. Unidad de reducción de emisiones certificada, obtenida a través de proyectos de mecanismo de desarrollo limpio.
2. Unidad de reducción de emisiones, obtenida a través de proyectos de ejecución conjunta.

3. Unidad de cantidad atribuida, obtenida a través del intercambio de emisiones atribuidas no utilizadas entre las partes del protocolo.
4. Unidad de remoción, obtenida a través de proyectos relacionados con la reforestación.

El papel de los derechos de propiedad intelectual (DPI) es particularmente controvertido. Los países en desarrollo han abogado por la creación de un régimen de DPI diferente para las tecnologías respetuosas con el clima a fin de fomentar la difusión, mientras que los países industrializados afirman que los incentivos proporcionados por los regímenes de DPI existentes refuerzan los incentivos de difusión al garantizar a los titulares de patentes los beneficios que resultan de sus invenciones (Perdan y Azapagic 2011).

Villoria-Sáez et al. investigó empíricamente la efectividad de la implementación del esquema de comercio de emisiones de gases de efecto invernadero en las reducciones de emisiones reales que cubren seis regiones emisoras principales. La investigación presentó una serie de hallazgos; primero, es posible reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en aproximadamente un 1,58 % anual tras la implementación del esquema. Además, después de 10 años de implementación, se puede lograr aproximadamente un 23,43% de reducción de emisiones en comparación con un escenario de no implementación (Villoria-Sáez et al. 2016).

El desafío de la difusión de tecnología a escala mundial también se ve agravado por la falta de información. No existe una definición clara y ampliamente aceptada de lo que constituye una “tecnología de mitigación del cambio climático” ni una comprensión generalizada de cómo dichas tecnologías se difunden a nivel mundial. (Wang et al. 2016).

La enmienda proponía un objetivo de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de al menos un 18 % por debajo de los niveles de 1990 (UNFCCC 2012).

El acuerdo tiene como objetivo alcanzar el punto máximo global de gases de efecto invernadero lo antes posible para lograr un equilibrio entre las fuentes de emisiones inducidas por el hombre y los sumideros y depósitos de gases de efecto invernadero entre 2050 y 2100.

El acuerdo aboga por una mayor transparencia, cumplimiento e informes y comunicaciones claros. Además, el acuerdo exige el apoyo financiero y tecnológico, así como las iniciativas de creación de capacidad para los países en desarrollo.

Quizás, uno de los objetivos más importantes establecidos en el acuerdo es el de la adaptación y el desarrollo de capacidades de adaptación en relación con el objetivo de temperatura establecido (ONU 2015).

Los enfoques cooperativos son un marco que permite a las partes utilizar los resultados de mitigación transferidos internacionalmente (ITMO) para cumplir con los objetivos de contribución determinados a nivel nacional, así como para estimular el desarrollo sostenible.

La innovación parece estar altamente concentrada: los doce países principales representan casi el 90 por ciento de todas las invenciones entre 2000 y 2005. Japón, Estados Unidos y Alemania son los tres principales países inventores de la mayoría de las tecnologías. Con el 37 por ciento de los inventos del mundo, el desempeño de Japón es particularmente impresionante (Gao et al. 2019).

En comparación, si no se tomaran medidas, se proyecta un aumento del 31,5 % en las emisiones globales. Se concluye que, si se mantiene el nivel de emisiones previsto en el mejor de los casos entre 2030 y 2050, se produciría un aumento de la temperatura de al menos 3 °C. Además, se aseguraría un aumento de 4 °C si las emisiones anuales continúan aumentando (Nieto, Carpintero y Miguel 2018).

Para alcanzar el objetivo de 1,5 °C para finales de siglo, el IPCC estableció que para 2030 las emisiones de gases de efecto invernadero deberían mantenerse entre 25 y 30 GtCO₂ e año⁻¹. En comparación, las actuales contribuciones incondicionales determinadas a nivel nacional para 2030 se estiman en 52–58 GtCO₂ e año⁻¹. Según el modelo de trayectoria para un escenario de calentamiento de 1,5 °C, se debe alcanzar una disminución del 45 % en las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero para 2030 en comparación con los niveles de 2010, y se deben lograr emisiones netas cero para 2050 (IPCC 2018).

Cada vez hay más pruebas que confirman que los esfuerzos de mitigación actuales, así como los compromisos de emisiones futuras, no son suficientes para alcanzar los objetivos de temperatura establecidos por el acuerdo de París (Nieto, Carpintero y Miguel 2018). Deben explorarse nuevas medidas y vías de reducción si se quiere intentar alcanzar tales objetivos.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Una revisión sistemática implica un resumen crítico y reproducible de los resultados de las publicaciones disponible sobre un mismo tema o pregunta clínica concreta (Linares-Espinós et al., 2018). El carácter sistemático de la investigación da por certero que se basó en una disciplina, y que el análisis se basó en estrictos procedimientos (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018, p.34).

Un estudio de enfoque cualitativo es representado por el análisis sistemático de fenómenos, contrario a lo que comúnmente sucede, no se inicia con una teoría marcada para confirmar si esta es apoyada por los datos y resultados, sino que el proceso empieza examinando los hechos en sí y revisando los estudios previos, ambas acciones de manera simultánea, a fin de generar una teoría que sea consistente con lo que está observando que ocurre (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018, p.46).

La presente investigación se propuso indagar la literatura sobre la evaluación de las estrategias alternativas para la mitigación del cambio climático; y cuáles están tomando importancia en la actualidad; en este caso, en un tiempo único, referido a cómo se encuentran desarrollados esos conceptos en la actualidad, tratándose de una investigación Transversal descriptiva (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018, p.217).

Que el diseño cualitativo sea sistemático implica que hay una disciplina para realizar la investigación científica y que no se dejan los hechos a la casualidad. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p.34)

Esta investigación cumple con el propósito fundamental de producir conocimiento y teorías, investigación básica (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 29), puesto que responde al propósito de

responder sobre cuáles son las tecnologías de mitigación al cambio climático convencionales, las tecnologías de emisiones negativas y las tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiactivo.

3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística

OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	PROBLEMAS ESPECÍFICOS	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA
Revisar estrategias alternativas para la mitigación del cambio climático.	Analizar las tecnologías de mitigación al cambio climático convencionales.	¿Cuáles son las tecnologías de mitigación al cambio climático convencionales?	Tecnologías de mitigación al cambio climático convencionales.	<ul style="list-style-type: none"> • Energía renovable. • La energía nuclear. • Captura, almacenamiento y utilización de carbono.
	Evaluar las tecnologías de emisiones negativas.	¿En qué consisten las tecnologías de emisiones negativas?	Tecnologías de emisiones negativas.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Captura y almacenamiento de carbono bioenergético. ▪ Forestación y reforestación. ▪ Biocarbón. ▪ Secuestro de carbono del suelo. ▪ Captura y almacenamiento directo de carbono en el aire. ▪ Fertilización del océano. ▪ Meteorización terrestre mejorada. ▪ Mejora de la alcalinidad del océano. ▪ Restauración y construcción de humedales. ▪ Técnicas alternativas de utilización y almacenamiento de emisiones negativas.

OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	PROBLEMAS ESPECÍFICOS	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA
	Explicar las tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiativo.	¿Qué se sabe sobre las tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiativo?	Tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiativo.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inyección de aerosol estratosférico. ▪ Aclaramiento del cielo marino. ▪ Espejos basados en el espacio. ▪ Brillo basado en superficies. ▪ Adelgazamiento de cirros. ▪ Técnicas diversas de gestión de la radiación.

3.3. Escenario de estudio

La búsqueda se refinó a un período de 5 años desde 2015 hasta 2020 para evaluar específicamente los esfuerzos de investigación científica relacionados con la mitigación del cambio climático después del acuerdo de París en 2015.

3.4. Participantes

Los términos de búsqueda comprendieron:

- Tópico: (*“Climate change mitigation”*) OR (*“climate change abatement”*) OR (*“Decarbonization Technologies”*)
- Tópico: (*“Bioenergy Carbon Capture & Storage”*) OR (*“Afforestation & Reforestation”*) OR (*“Soil Carbon Sequestration”*) OR (*“Direct Air Carbon Capture & Storage”*) OR (*“Carbon Dioxide Removal Techniques”*)
- Tópico: (*“Ocean Fertilization”*) OR (*“Enhanced Terrestrial Weathering”*) OR (*“Ocean Alkalinity Enhancement”*) OR (*“Marine Sky Brightening”*) OR (*“Cirrus Cloud Thinning”*)
- Tópico: (*“Wetland Restoration & Construction”*) OR (*“Stratospheric Aerosol Injection”*) OR (*“Space-Based Sunshade/Mirrors”*) OR (*“Surface-Based Brightening”*) OR (*“Radiative Forcing Geoengineering”*)

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

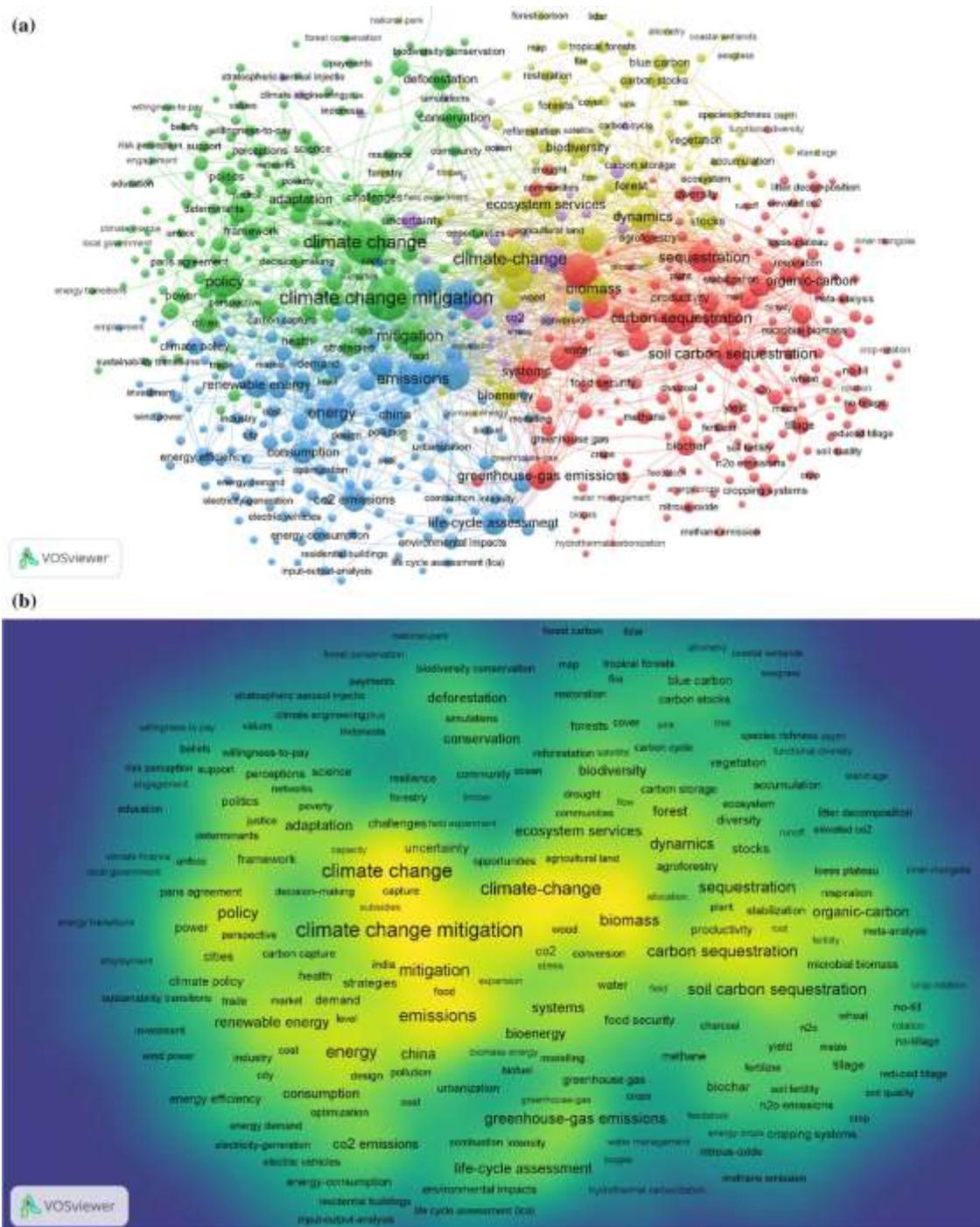
En este análisis se utilizó la base de datos de la colección principal de *Web of Science* (WoS).

3.6. Procedimientos

Se recuperaron un total de 3993 artículos (3386 artículos, 362 revisiones, 201 actas, 71 acceso temprano y 61 materiales editoriales). Los resultados obtenidos luego se analizaron utilizando el software

VOSviewer trazando mapas de visualización de red y densidad como se muestra en la Fig. 1. Los mapas se basan en coincidencias de palabras clave.

Figura N° 1. Análisis bibliométrico de la investigación sobre la mitigación del cambio climático: un mapa de visualización de red y un mapa de b, que muestra el estado reciente de la investigación científica sobre el tema de la mitigación del cambio climático destacando



3.7. Rigor científico

Aunque la investigación sobre la mitigación del cambio climático está de moda, se puede destacar una brecha en la literatura con respecto a la investigación relacionada con tecnologías específicas de mitigación.

3.8. Método de análisis de información

Una extensa revisión de la literatura cubrió tres estrategias principales para abordar el cambio climático, tecnologías de mitigación convencionales, tecnologías de emisiones negativas y tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiativo.

3.9. Aspectos éticos

Con el fin de exponer el interés por indagar la realidad en forma sistemática proponiendo soluciones a las problemáticas ambientales respecto a qué tanto se conoce sobre las estrategias alternativas para la mitigación del cambio climático que están tomando importancia en la actualidad. Siendo así, se destaca lo siguiente sobre esta investigación:

- A. Respeto a la autoría de las fuentes de información. Esto se logra citando apropiadamente con estilos internacionales.
- B. Cumplimiento de los principios éticos del colegio profesional al que pertenecerán los autores.
- C. Cumplimiento de los aspectos relevantes del código de ética de la investigación de la universidad o de la institución que autoriza la investigación.

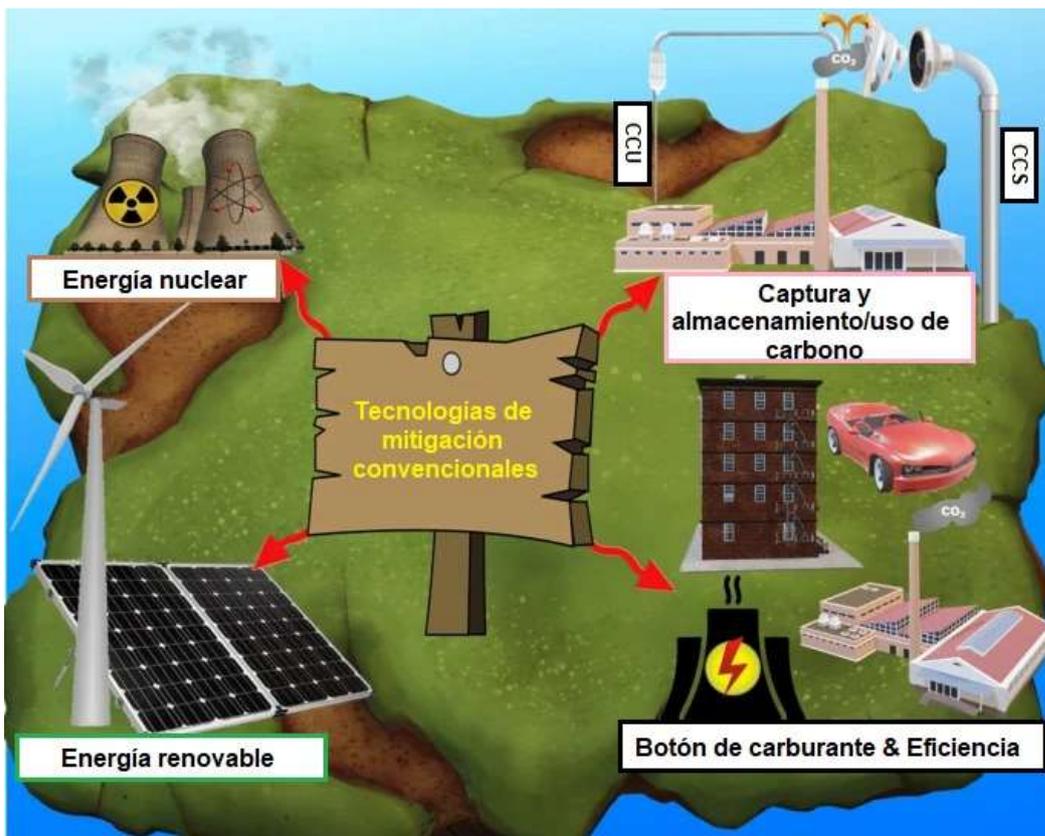
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Tecnologías de mitigación convencionales

Como se mencionó anteriormente, las emisiones relacionadas con la energía son el principal impulsor del aumento de los niveles de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera; por lo tanto, las tecnologías y los esfuerzos de mitigación convencionales deben centrarse tanto en el lado de la oferta como en el de la demanda de energía (Mathy, Menanteau y Criqui 2018).

La Figura 2 muestra las tecnologías y técnicas de mitigación convencionales discutidas en la literatura y revisadas críticamente en este documento.

Figura N 2. Principales tecnologías de descarbonización que se centran en la reducción de las emisiones de CO₂ relacionadas con la oferta y la demanda de energía.



Energía renovable

Según un reciente informe sobre el estado mundial de las energías renovables, la proporción de energía renovable del consumo total de energía final a nivel mundial se estimó en un 18,1 % en 2017 (REN21 2019). A lo largo de la literatura se analiza una variedad de tecnologías modernas de energía renovable. Las tecnologías más destacadas incluyen energía solar fotovoltaica, energía solar concentrada, energía solar térmica para aplicaciones de calefacción y refrigeración, energía eólica terrestre y marina, energía hidroeléctrica, energía marina, energía geotérmica, energía de biomasa y biocombustibles (Østergaard et al. 2020).

Los edificios también pueden beneficiarse de las tecnologías solares y basadas en biomasa para los requisitos de energía, calefacción y refrigeración. En relación con el sector del transporte, el cambio de combustible de uso final es un factor determinante para la descarbonización del sector. Algunos ejemplos de biocombustibles son el biodiésel, el bioetanol de primera y segunda generación, el biohidrógeno, el biometano y el biodimetiléter (bio-DME) (Srivastava et al. 2020).

Además, el hidrógeno producido mediante electrólisis con energías renovables es un combustible renovable potencial para la descarbonización del sector. Otro ejemplo de descarbonización del sector a través del despliegue de energía renovable son los vehículos eléctricos que utilizan energía renovable (Michalski, Poltrum y Bünger 2019).

Esto se ha superado mediante la integración de tales tecnologías con el almacenamiento, así como con otras tecnologías renovables de red y de carga base. Sinsel et al. discutir cuatro áreas de desafío específicas relacionadas con las energías renovables variables, a saber, calidad, flujo, estabilidad y equilibrio. Además, presentan una serie de soluciones que giran principalmente en torno a la flexibilidad y las tecnologías de red para sistemas distribuidos y centralizados (Sinsel, Riemke y Hoffmann 2020).

Las dimensiones económicas, sociales y políticas juegan un papel influyente en la innovación y el despliegue de tecnologías de energía renovable.

Además, el estudio investigó el impacto de cada clasificación de política en la actividad de innovación de varias tecnologías de energía renovable: solar, eólica, biomasa, geotérmica e hidráulica. Sin embargo, el estudio sugirió que los instrumentos de políticas de atracción de la demanda son más efectivos para impulsar la innovación en energía renovable en comparación con los tipos de políticas alternativas (Pitelis, Vasilakos y Chalvatzis 2020).

Sobre las barreras y los impulsores del despliegue de energías renovables, Shivakumar et al. destacó varias dimensiones que pueden obstaculizar o permitir el desarrollo de proyectos de energía renovable. Los puntos principales destacados giran en torno a la política, el acceso financiero, la estabilidad del gobierno y las intenciones a largo plazo, los procedimientos administrativos y el marco de apoyo o la falta de ellos, así como la rentabilidad de las inversiones en energía renovable (Shivakumar et al. 2019).

En cuanto a la relación entre la accesibilidad financiera y el despliegue de energías renovables, Kim et al. investigó empíricamente dicha relación mediante el análisis de un conjunto de datos de panel de 30 países durante un período de 13 años desde 2000 hasta 2013. La evidencia estadística muestra el impacto positivo de los mercados financieros bien desarrollados en el despliegue de energía renovable y el crecimiento del sector (Kim y Park 2016).

La energía nuclear

Se proyecta que se logrará un aumento del 30% en la capacidad instalada para 2030 (desde un caso base de 392 GW en 2017). Como escenario de proyección de caso bajo, se estima que para 2030 se podría realizar una

caída del 10 % en función de las cifras de 2017. A largo plazo, se proyecta que la capacidad global podría alcanzar los 748 GW para 2050, como un escenario de caso alto (Organismo Internacional de Energía Atómica 2018).

La investigación demuestra el importante papel que ha desempeñado la energía nuclear en términos de contribución a la producción mundial de energía, así como su potencial de descarbonización en el sistema energético mundial. El documento sugiere que para estar en línea con el objetivo de 2 °C estipulado por el acuerdo de París, la capacidad de la planta nuclear debe expandirse a aproximadamente 930 GW para 2050, con una inversión total de aproximadamente \$ 4 billones (Práválie y Bandoc 2018).

Si bien se sugiere que las plantas nucleares convencionales basadas en la fisión se eliminen gradualmente en el futuro, la introducción de tecnología nuclear mejorada basada en la fusión puede contribuir positivamente a los esfuerzos de mitigación en la segunda mitad del siglo. La energía de fusión es una nueva generación de energía nuclear, que es más eficiente que la tecnología convencional basada en la fisión y no conlleva el riesgo de eliminación de desechos peligrosos asociado con la tecnología nuclear convencional basada en la fisión. Además, la energía de fusión se caracteriza por ser una tecnología de cero emisiones (Gi et al. 2020).

Captura, almacenamiento y utilización de carbono

Cada tecnología lleva un proceso específico de extracción y captura de CO₂. Con base en la literatura, las opciones de almacenamiento incluyen yacimientos de petróleo y gas agotados, lechos de carbón y acuíferos salinos subterráneos que no se usan para agua potable (Vinca et al. 2018).

Los impactos ambientales negativos que pueden resultar de los lugares de almacenamiento en tierra que sufren fugas accidentales han sido investigados por Ma et al (2018).

Otros problemas relacionados con esta tecnología incluyen la aceptación pública (Tcvetkov, Cherepovitsyn y Fedoseev 2019), así como los altos costos de implementación asociados (Vinca et al. 2018).

El despliegue a gran escala de tecnologías de almacenamiento y utilización de captura de carbono aún no se ha probado. Hay 9 proyectos más de captura de carbono en desarrollo y se prevé que aumenten la capacidad a 11 MtCO₂ para 2025; sin embargo, existe una desviación significativa del escenario de desarrollo sostenible previsto por la agencia internacional de energía para 2040, que es una capacidad de 1488 MtCO₂ (Agencia Internacional de Energía 2019a).

Cambio de combustible y ganancias de eficiencia

El cambio de combustible en el sector eléctrico de carbón a gas, a corto plazo, se ha discutido ampliamente en la literatura como un enfoque potencial para la transición económica a una economía baja en carbono y, con suerte, cero carbono en el futuro (Wending 2019). El paso al gas natural también es aplicable a los sectores de la industria, el transporte y la construcción; sin embargo, como se discutió anteriormente, el cambio a combustibles renovables es un enfoque más sostenible que crea un mayor potencial de descarbonización en estos sectores.

Además del cambio de combustible, las ganancias en eficiencia son de suma importancia dentro de los esfuerzos de mitigación. Además, la recuperación del calor residual para la producción térmica y eléctrica adicional mejora la eficiencia. En las centrales eléctricas de gas, la utilización de una tecnología de ciclo combinado mejora significativamente la eficiencia (REN21 2019).

Para las industrias que utilizan vapor de proceso, existe una excelente oportunidad de utilizar la presión de vapor de desecho para generar energía eléctrica para uso en el sitio o para accionar equipos rotativos. La aplicación de turbinas de vapor de contrapresión en áreas donde se requiere una reducción de la presión de vapor puede mejorar significativamente la eficiencia energética.

El mismo enfoque se puede implementar en aplicaciones donde se requiere una reducción de la presión del gas, sin embargo, utilizando turboexpansores. Además, se pueden lograr mayores ganancias de eficiencia mediante el despliegue de controles de maquinaria avanzados en una multitud de procesos y sectores industriales.

Una serie de factores influyen en la eficiencia energética de los edificios, en primer lugar, el diseño del edificio, así como los materiales utilizados en la construcción, por ejemplo, el aislamiento y el acristalamiento. Además, los aparatos, dispositivos y sistemas utilizados en los edificios, por ejemplo, los sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación, y la iluminación, desempeñan un papel fundamental en el consumo de energía. Las ganancias de eficiencia se pueden lograr mediante la utilización de sistemas y aparatos de eficiencia energética, así como materiales de construcción mejorados (Leibowicz et al. 2018).

En el sector del transporte, las ganancias de eficiencia se pueden lograr mediante la introducción de motores térmicos mejorados y más eficientes, vehículos híbridos y eléctricos, así como vehículos de hidrógeno (H₂) (ANCRE 2015).

Además, cambiar los viajes a los modos más eficientes cuando sea posible, como el tren electrificado, y reducir la dependencia de los métodos de viaje de alta intensidad puede desempeñar un papel interesante en la mejora de la eficiencia (Agencia Internacional de Energía 2019b).

4.2. Tecnologías de emisiones negativas

Hasta el momento, solo se han incluido dos tecnologías de emisiones negativas en las evaluaciones del IPCC, captura y almacenamiento de carbono bioenergético, así como forestación y reforestación (IPCC 2018). Con base en el peor de los casos, se requieren emisiones negativas de 7–11 Gt C año⁻¹ y 1000–1600 Gt C de capacidad de almacenamiento. (1 gigatonelada de carbono = 3,6667 gigatoneladas de CO₂).

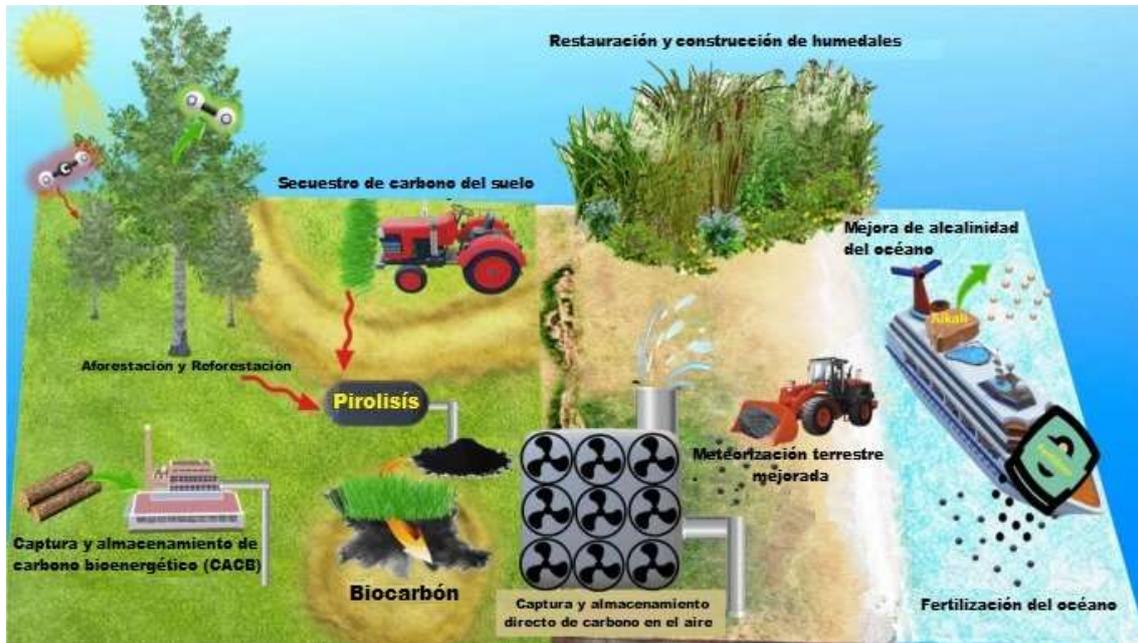
Además, el estudio sugiere que no se debe confiar únicamente en las emisiones negativas para alcanzar el objetivo de 2 °C. La investigación concluyó que, dado que las tecnologías de emisiones negativas aún se encuentran en una etapa incipiente de desarrollo, las tecnologías de mitigación convencionales deben seguir centrándose en la política climática, mientras que se deben movilizar más recursos financieros para acelerar el desarrollo de tecnologías de emisiones negativas (Gasser et al. 2015).

Se argumenta que las tecnologías de emisiones negativas deben implementarse para eliminar las emisiones residuales después de que se hayan maximizado todos los esfuerzos de descarbonización convencionales y que dicho enfoque debe utilizarse para eliminar las emisiones que son difíciles de eliminar a través de métodos convencionales (Lin 2018). Es importante tener en cuenta que las emisiones negativas deben verse como un conjunto complementario de tecnologías y técnicas a los métodos de descarbonización convencionales, y no como un sustituto (Pires 2019).

Esta sección llevará a cabo una extensa revisión de la literatura sobre las principales tecnologías y técnicas de emisiones negativas, su estado actual de desarrollo, las limitaciones y los riesgos percibidos, así como las implicaciones sociales y políticas. La Figura 3 muestra las principales tecnologías de emisiones negativas y los métodos de eliminación de

carbono discutidos en la literatura y revisados críticamente en este artículo.

Figura Nº 3. Principales tecnologías y técnicas de emisiones negativas que se implementan para capturar y secuestrar carbono de la atmósfera.



Este enfoque incluye captura y almacenamiento de carbono bioenergético, forestación y reforestación, biocarbón, secuestro de carbono del suelo, meteorización terrestre mejorada, restauración y construcción de humedales, captura y almacenamiento directo de carbono en el aire, mejora de la alcalinidad de los océanos y fertilización de los océanos.

Captura y almacenamiento de carbono bioenergético

La captura y el almacenamiento de carbono de la bioenergía, también conocida como BECCS, es una de las tecnologías de emisiones negativas destacadas discutidas ampliamente en la literatura (IPCC 2018). Las de CO₂ generadas por la combustión se capturan y almacenan en reservorios geológicos adecuados (Pires 2019).

Dichas materias primas pueden utilizarse como materias primas de base biológica dedicadas o pueden combinarse con combustibles de origen fósil en centrales eléctricas de combustión conjunta (The Royal Society 2018). Además de la ruta de combustión estándar, la literatura sugiere que el CO₂ puede capturarse en aplicaciones biológicas que no son de energía, como durante el proceso de fermentación en la producción de etanol o la gasificación de efluentes de pulpa de madera, por ejemplo, licor negro, en la producción de pulpa (Pires 2019).

Bajo un despliegue a gran escala, la demanda de recursos al utilizar cultivos dedicados sería bastante significativa, con una gran presión ejercida sobre la tierra, el agua y los recursos de nutrientes (The Royal Society 2018).

Diablos et al. investigó empíricamente el despliegue a gran escala de captura y almacenamiento de carbono bioenergético para la reducción del cambio climático y demostró su impacto en el uso de agua dulce, el cambio del sistema terrestre, la integridad de la biosfera y los flujos biogeoquímicos (Heck et al. 2018). Un enfoque sostenible del uso de la tierra es fundamental para abordar la captura y el almacenamiento de carbono bioenergético.

Esto se aplica principalmente en lugares de latitudes altas, donde la biomasa reemplaza la capa de nieve y reduce el potencial de reflexión de la radiación, lo que compensa los esfuerzos de mitigación (Fuss et al. 2018).

Además, Mander et al. analizar las dificultades técnicas para escalar la implementación en un período breve. En términos de política, se argumenta que es necesario establecer un marco sólido, así como incentivos adecuados, para impulsar adecuadamente la tecnología (Mander et al. 2017).

Forestación y reforestación

La forestación se puede implementar mediante el establecimiento de nuevos bosques, lo que se conoce como forestación, o el restablecimiento de áreas forestales anteriores que han sufrido deforestación o degradación, lo que se conoce como reforestación.

Dependiendo de las especies de árboles, una vez que se establecen los bosques, la absorción de CO₂ puede durar de 20 a 100 años hasta que los árboles alcanzan la madurez y luego las tasas de secuestro se ralentizan significativamente. En esa etapa, los productos forestales pueden cosecharse y utilizarse. Se argumenta que las actividades y prácticas de manejo forestal tienen un impacto ambiental y deben planificarse cuidadosamente (The Royal Society 2018).

Otro problema relacionado con la forestación es la necesidad de tierra, así como la competencia con otros usos de la tierra. Se requieren cantidades significativas de tierra para lograr resultados efectivos de reducción (The Royal Society 2018).

Fuss et al. discutir otro tema y ese es el efecto albedo. Los bosques en latitudes altas en realidad serían contraproducentes, ya que acelerarían el calentamiento local y la pérdida de la cubierta de hielo y nieve. Argumentan que las áreas tropicales serían las zonas más adecuadas para albergar proyectos de forestación. Sin embargo, la competencia con la agricultura y otros sectores por la tierra será otro problema.

Con base en las limitaciones de los límites tropicales globales, se argumenta que un área total estimada de 500 Mha es adecuada para el despliegue de forestación. Esto permitiría un potencial de eliminación global de dióxido de carbono de 0,5 a 3,6 GtCO₂ años⁻¹ para 2050. Los costos de eliminación se estiman en \$5–\$50/tCO₂ (Fuss et al. 2018).

En términos de preparación tecnológica, la forestación y la reforestación ya se han adoptado ampliamente a nivel mundial y ya se han integrado dentro de las políticas climáticas a través del programa del mecanismo de desarrollo limpio del protocolo de Kioto desde la década de 1990. Para impulsar los esfuerzos de mitigación basados en los bosques, el protocolo introdujo unidades de remoción que permitieron que los proyectos de forestación generaran créditos negociables.

A pesar de las primeras medidas políticas, los esfuerzos de mitigación basados en los bosques representaron una pequeña fracción de las emisiones en ese momento (Gren y Zeleke 2016).

Biocarbón

El carbono capturado por la biomasa a través de la absorción de CO₂ durante el crecimiento de las plantas se procesa luego en un carbón que se puede aplicar a los suelos durante períodos prolongados. El proceso de conversión almacena el carbono de la biomasa en una forma que es muy estable y resistente a la descomposición (Chen et al. 2019).

El potencial de eliminación de carbono, así como los costos, varían mucho en la literatura; sin embargo, Fuss et al. proporcionan un rango conservador. Se estima que para 2050 el potencial de eliminación de reducción de carbono global logrado a través del biochar puede estar en el rango de 0.3–2 Gt CO₂ año⁻¹, con costos que oscilan entre \$ 90 y \$ 120/tCO₂ (Fuss et al. 2018).

En términos de requisitos de recursos, la producción de biocarbón requeriría grandes cantidades de tierra para tener un impacto efectivo en los niveles de concentración de gases de efecto invernadero. Se requiere tierra para el cultivo de materia prima, así como para la dispersión de biocarbón que actúa como sumidero de carbono.

Además del suelo, Schmidt et al. introdujo otras aplicaciones de sumideros de carbono para biocarbón que incluyen materiales de construcción, tratamiento de aguas residuales y productos electrónicos, siempre que el producto no se degrade térmicamente ni se oxide a lo largo de su ciclo de vida (Schmidt et al. 2019).

Además, se ha argumentado en la literatura que las tierras marginales y degradadas pueden utilizarse potencialmente para plantaciones dedicadas, aliviando la presión sobre las tierras que pueden utilizarse para otros fines (The Royal Society 2018).

Esto es específico del sistema de cultivo, así como del tipo de biocarbón utilizado y sus condiciones de procesamiento (Semida et al. 2019). Por lo tanto, el impacto sobre las emisiones de gases de efecto invernadero debe estudiarse caso por caso (Xiao et al. 2019).

Se argumenta que la calidad del suelo y la fertilidad mejoran significativamente. Tales propiedades están definidas por el tipo de materia prima utilizada, las condiciones de pirólisis y otras condiciones de procesamiento.

Además, a pesar de la percepción general de que el biocarbón tiene un impacto positivo en el crecimiento y la producción de las plantas, lo cual es cierto en una gran cantidad de casos, existe evidencia de que la aplicación de biocarbón puede obstaculizar el crecimiento de las plantas en ciertos sistemas de cultivo. La evidencia es mixta y, por lo tanto, se debe llevar a cabo un análisis cuidadoso para combinar con éxito el biocarbón con los sumideros de carbono apropiados (Oni, Oziegbe y Olawole 2019).

Con altas tasas de aplicación de biocarbón a la superficie del suelo, por ejemplo, 30 a 60 toneladas/ha, se argumenta que una disminución en la reflectividad de la superficie aumentaría la temperatura del suelo, lo que

a su vez reduciría el efecto beneficioso del secuestro de carbono a través de esta ruta (The Royal Society 2018).

Además, los incentivos y apoyos políticos limitados, así como la falta de mecanismos de fijación de precios del carbono que incorporen la eliminación de CO₂ a través del biocarbón (Ernsting, Smolker y Paul 2011), dificultan el potencial de comercialización a gran escala de esta tecnología. Pourhashem et al. examinó el papel de la política gubernamental en la aceleración de la adopción del biocarbón e identificó tres tipos de instrumentos de política existentes que se pueden utilizar para estimular el despliegue del biocarbón en los EE (Pourhashem et al. 2019).

Con los avances tecnológicos actuales, en particular blockchain, varias empresas emergentes están desarrollando plataformas de eliminación de carbono para impulsar compensaciones voluntarias de carbono para consumidores y corporaciones. Una vez verificados a través del sistema de verificación de la empresa, los certificados de eliminación de carbono generados por los productores de biocarbón se subastan a posibles partes de compensación.

Sin embargo, hasta que la remoción de carbono sea monetizada adecuadamente y apoyada a través de suficientes instrumentos de política, el desarrollo de proyectos de biocarbón probablemente no alcanzará la escala requerida para tener un impacto profundo dentro del marco de tiempo exigido por la política internacional.

Secuestro de carbono del suelo

El secuestro de carbono del suelo es el proceso de capturar el CO₂ a través del cambio de prácticas de gestión de la tierra para aumentar el contenido de carbono del suelo. El nivel de concentración de carbono en el suelo está determinado por el equilibrio de las entradas, por ejemplo, residuos, hojarasca, raíces y estiércol, y las pérdidas de carbono

realizadas a través de la respiración, que está influenciada principalmente por la alteración del suelo (The Royal Society 2018).

Está bien señalado en la literatura que el secuestro de carbono del suelo promueve una mayor fertilidad y salud del suelo, así como también mejora el rendimiento de los cultivos debido a la acumulación de carbono orgánico dentro de los suelos (Fuss et al. 2018).

En la literatura se analizan varias prácticas de manejo de la tierra que promueven el secuestro de carbono del suelo, que incluyen prácticas de rotación e intensidad del sistema de cultivo, prácticas de labranza cero y de conservación, manejo de nutrientes, cobertura y uso de residuos de cultivos y estiércol, incorporación de biocarbón, uso de fertilizantes y gestión del agua (Farooqi et al. 2018).

Agostini et al. investigó el impacto de los sistemas de cultivos perennes herbáceos y leñosos en el carbono orgánico del suelo y confirmó un aumento en los niveles de carbono orgánico del suelo de 1,14 a 1,88 $tCha^{-1} año^{-1}$ para cultivos herbáceos y de 0,63 a 0,72 $tCha^{-1} año^{-1}$ para cultivos leñosos. Se informa que estos valores están muy por encima del requisito de secuestro propuesto (0,25 $tCha^{-1} año^{-1}$) para que el cultivo sea neutro en carbono una vez convertido en biocombustibles (2015).

Los principales problemas relacionados con este enfoque giran en torno a la permanencia, la saturación de los sumideros y el impacto en otras emisiones de gases de efecto invernadero. Una vez que los suelos alcanzan un nivel de saturación, ya no se logra un mayor secuestro (Fuss et al. 2018).

Una vez que se alcanza la saturación, las prácticas de manejo de la tierra deben mantenerse indefinidamente para mitigar la reversión. Los riesgos de reversibilidad son significativos y debilitan la integridad del almacenamiento de este enfoque (Fuss et al. 2018).

Para 2050, el potencial global de eliminación de dióxido de carbono discutido en la literatura se estima entre 2,3 y 5,3 GtCO₂ año⁻¹ a costos que oscilan entre \$ 0 y \$ 100 t/CO₂ (Fuss et al. 2018).

Sin embargo, las políticas no climáticas han promovido principalmente prácticas de gestión de la tierra para mejorar la calidad, la fertilidad y la productividad del suelo, así como para prevenir la degradación de la tierra (The Royal Society 2018).

Si bien se requieren mecanismos basados en políticas y en el mercado para impulsar este enfoque, están surgiendo plataformas internacionales voluntarias de eliminación de carbono. Usando la tecnología blockchain, esta empresa da un paso más en la lucha contra los desafíos asociados con los sistemas de monitoreo, reporte y verificación.

Captura y almacenamiento directo de carbono en el aire

La captura y almacenamiento directo de carbono en el aire, también conocida como DACCS en la literatura, está emergiendo como una posible tecnología sintética de eliminación de CO₂.

Los adsorbentes luego se regeneran mediante la aplicación de calor o agua para liberar el CO₂ para su almacenamiento o utilización (Gambhir y Tavoni 2019). Además de la energía requerida para la regeneración del sorbente, se requiere energía para ventiladores, bombas y compresores para presurizar el CO₂ (Fuss et al. 2018).

Otro inconveniente importante destacado en la literatura es el costo significativo asociado con el desarrollo de proyectos directos de captura y almacenamiento de carbono en el aire (Fuss et al. 2018). El mayor riesgo asociado con esta tecnología es la integridad del almacenamiento de CO₂, similar a la captura y almacenamiento de carbono y la captura y almacenamiento de carbono bioenergético (The Royal Society 2018).

Gambhir et al. compare la captura y el almacenamiento directos de carbono en el aire con la captura y el almacenamiento de carbono y explique que la primera tecnología requiere más energía y materiales debido al hecho de que capturar CO₂ del aire ambiente es mucho más difícil en comparación con capturar CO₂ de una combustión altamente concentrada corrientes de gases La captura directa de carbono en el aire consume tres veces más energía en comparación con la captura de carbono convencional por tonelada de CO₂ eliminada (2019).

Sin embargo, las plantas de captura y almacenamiento directo de carbono en el aire son más flexibles y pueden ubicarse en cualquier lugar, siempre que se disponga de energía baja en carbono y de instalaciones adecuadas de transporte y almacenamiento. En términos de preparación tecnológica, muchos procesos se están desarrollando actualmente y se encuentran en fases a escala de laboratorio o a escala piloto. Los desarrolladores de tecnología están trabajando principalmente en la reducción de los requisitos de energía, ya que este es uno de los principales desafíos para la implementación y la escalabilidad (The Royal Society 2018).

El potencial global para la eliminación de dióxido de carbono ha sido estimado por Fuss et al. estar en el rango de 0,5–5 GtCO₂ año⁻¹ para 2050, y esto podría llegar a 40 GtCO₂ año⁻¹ para finales de siglo si se superan los desafíos inesperados asociados con el despliegue a gran escala (The Royal Society 2018).

Fertilización del océano

La fertilización del océano es el proceso de agregar nutrientes, macro como el fósforo y los nitratos, así como micro como el hierro, a la superficie superior del océano para mejorar la absorción de CO₂ mediante la promoción de la actividad biológica. Los organismos microscópicos, llamados fitoplancton, que se encuentran en la capa superficial de los océanos contribuyen de manera importante al concepto de secuestro de

carbono oceánico. El CO₂, en forma de biomasa marina orgánica, se transporta naturalmente a las profundidades del océano; este proceso se denomina “la bomba biológica”.

Es importante señalar que este flujo descendente está hasta cierto punto equilibrado por la respiración del carbono oceánico. Al igual que las plantas terrestres, el fitoplancton utiliza luz, CO₂ y nutrientes para crecer (The Royal Society 2018).

Aunque no hay mucha información en la literatura sobre el potencial de eliminación de carbono, se estima que la fertilización de los océanos puede secuestrar potencialmente hasta 3,7 GtCO₂ año⁻¹ para 2100 con una capacidad de almacenamiento global total de 70–300 GtCO₂ (The Royal Society 2018).

Los efectos secundarios de la fertilización del océano que se discuten en la literatura incluyen la acidificación del océano, la disminución o el agotamiento del oxígeno en aguas profundas y medias, el aumento en la producción de más gases de efecto invernadero, el impacto impredecible en los ciclos alimentarios, la creación de floraciones de algas tóxicas y efectos mixtos en los ecosistemas del fondo marino y del océano superior (Fuss et al. 2018).

El problema de la permeabilidad, el impacto en los ecosistemas, la baja eficiencia de secuestro, así como la falta de sistemas adecuados de monitoreo, reporte y verificación, no respaldan el concepto de que la fertilización de los océanos es un enfoque efectivo para la reducción del cambio climático (Fuss et al. 2018).

Meteorización terrestre mejorada

En el sistema natural, las rocas de silicato se descomponen; este es un proceso denominado meteorización. Esta reacción química consume CO₂ y libera iones metálicos, así como iones de carbonato y/o bicarbonato. Los

iones disueltos se transportan a través de las corrientes de agua subterránea hasta los ríos y finalmente terminan en el océano donde se almacenan como alcalinidad o se precipitan en el sistema terrestre como minerales de carbonato. La meteorización mejorada es un enfoque que puede acelerar este proceso de meteorización para mejorar la absorción de CO₂ en una escala de tiempo mucho más corta.

Luego, el material molido se aplica a las tierras de cultivo y proporciona una multitud de beneficios colaterales (Bach et al. 2019).

Esto incluye un impacto favorable en las propiedades hidrológicas del suelo, una fuente de nutrientes para las plantas que permite una menor dependencia de los fertilizantes convencionales, un aumento del pH del agua, una mejor salud del suelo, un aumento de la producción de biomasa y una oportunidad para reducir la dependencia de los pesticidas convencionales. Dichos beneficios dependen del tipo de roca y su tasa de aplicación, clima, suelo y sistema de cultivo (De Oliveira Garcia et al. 2020).

Lefebvre et al. investigó el secuestro de carbono a través de EW en Brasil mediante la realización de una evaluación del ciclo de vida para identificar el potencial de eliminación de carbono utilizando basalto en tierras agrícolas en Sao Paulo. Además, los resultados sugieren una tasa de captura de aproximadamente 0,11–0,2 tCO₂ e/tonelada de roca basáltica aplicada (2019).

Dependiendo de las condiciones, puede ocurrir la precipitación de minerales de carbonato en el suelo y dichos minerales pueden almacenarse durante un período prolongado (del orden de 10⁶ años) (Fuss et al. 2018).

Sobre la base de una extensa evaluación de la literatura, Fuss et al. estimar el potencial global de eliminación de carbono de 2–4 GtCO₂ año⁻¹ para 2050 a un costo que oscila entre \$ 50 y \$ 200/tCO₂ (Fuss et al. 2018).

Strefler et al. llevó a cabo una investigación tecnoeconómica sobre el potencial de eliminación de carbono y los costos de la meteorización mejorada utilizando dos tipos de roca (dunita y roca basáltica).

Es necesario desarrollar más investigaciones sobre las implicaciones sociales y ambientales, así como sistemas adecuados de monitoreo, informes y verificación para que este enfoque gane fuerza (The Royal Society 2018). Además, se requiere la integración dentro de los mercados de carbono y un precio adecuado del carbono para incentivar el despliegue.

Mejora de la alcalinidad del océano

La mejora de la alcalinidad del océano se ha discutido en la literatura como una ruta potencial para la captura y almacenamiento de carbono inorgánico dentro del océano. Esta sección se centrará en la captación oceánica de CO₂ a través de la difusión que se rige por la presión parcial oceánica de CO₂ (Renforth 2019).

Se argumenta que el aumento de la alcalinidad del océano disminuye la presión parcial de la superficie del océano, lo que promueve una mayor absorción de CO₂, con un importante efecto secundario positivo de reducción de la acidificación del océano (Renforth y Henderson 2017).

Si no se producen precipitaciones, los iones de bicarbonato y carbonato se transportan a través de las corrientes de agua y acaban en el océano, aumentando su alcalinidad.

Kheshgi propuso otro enfoque para aumentar la alcalinidad a mediados de la década de 1990 y es la adición de cal (CaO) a la superficie del océano. El principal inconveniente de este enfoque es la energía requerida para la calcinación de piedra caliza, así como el CO₂ emisiones realizadas (1995).

Además, se plantean problemas en torno al monitoreo y las regulaciones relacionadas con las modificaciones oceánicas (Renforth y Henderson 2017).

Actualmente, el océano almacena aproximadamente 140 000 GtCO₂ y, con algunos cambios en su química, puede almacenar del orden de billones de toneladas de CO₂ (Renforth y Henderson 2017). Sin embargo, se señala un riesgo de reversión si se produce una precipitación mineral, lo que reduce la capacidad de transporte de carbono del agua (The Royal Society 2018).

Según Renforth et al., el costo de eliminar el CO₂ a través de la mejora de la alcalinidad del océano se estima entre \$ 10 y \$ 190/tCO₂, según el enfoque utilizado para producir, transportar y distribuir el material alcalino (Renforth y Henderson 2017).

Restauración y construcción de humedales

Los humedales son ecosistemas de alta densidad de carbono que facilitan el secuestro de carbono atmosférico a través de la fotosíntesis y su posterior almacenamiento en la biomasa aérea y subterránea, así como en la materia orgánica del suelo (Villa y Bernal 2018). Los ejemplos de humedales incluyen turberas y hábitats costeros como bosques de manglares, marismas de marea y praderas de pastos marinos, también conocidos como ecosistemas de carbono azul.

Si bien se estima que las turberas y los humedales costeros almacenan entre el 44 y el 71 % del carbono biológico terrestre del mundo, dichas reservas de carbono son vulnerables al deterioro debido a la degradación del hábitat (The Royal Society 2018).

La investigación modeló cuatro escenarios: el primer escenario no incluyó manejo, el segundo agregó el impacto de un incendio catastrófico sin manejo, el tercero incorporó prácticas de manejo actuales, mientras que

el escenario final promovió mayores actividades de manejo (De Klein y Van der Werf 2014).

Técnicas alternativas de utilización y almacenamiento de emisiones negativas

Además, los desechos industriales que contienen concentraciones de dichos elementos, como la escoria de las plantas siderúrgicas y las cenizas volantes de las plantas de combustión de carbón, también son materiales adecuados para utilizar en el proceso de carbonatación (Galina, Arce y Ávila 2019).

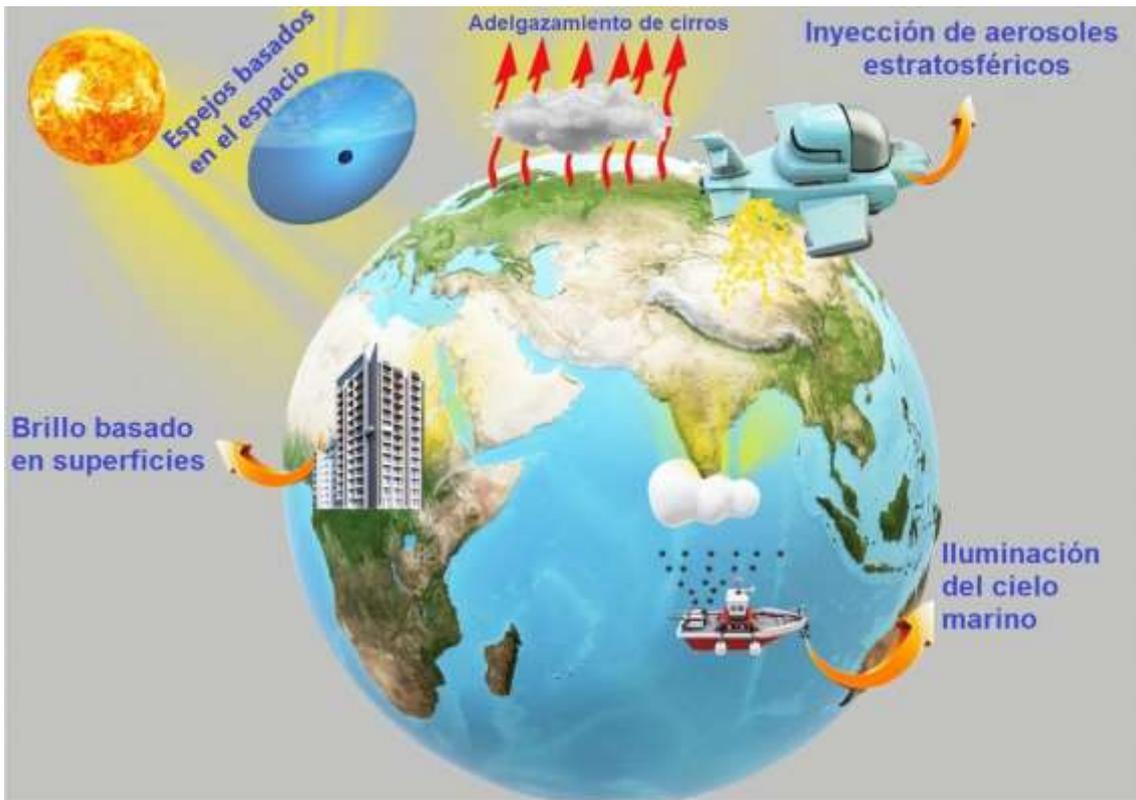
Una vía de aprovechamiento interesante de los carbonatos minerales es la sustitución de los áridos convencionales en la producción de hormigón. Sustituir los agregados con carbonatos minerales junto con el curado con CO₂ para acelerar el proceso de curado y lograr un material de concreto de mayor resistencia es un enfoque prometedor para secuestrar el CO₂ en el entorno construido (The Royal Society 2018).

La eliminación potencial de CO₂ se estima en aproximadamente 0,5–1 GtCO₂ año⁻¹, mediante la sustitución de materiales de construcción convencionales (The Royal Society 2018). Además del potencial de eliminación, al reemplazar los materiales de construcción convencionales, como el acero y el cemento, se pueden lograr más reducciones de emisiones, ya que estos son materiales intensivos en carbono. Estimaciones de reducción del 14 al 31 % en el CO₂ global emisiones y una reducción del 12% al 19% en el consumo global de combustibles fósiles se pueden lograr a través de este enfoque (The Royal Society 2018). Sin embargo, se requieren importantes proyectos de forestación sostenible.

4.3. Tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiativo

Esto se logra aumentando la reflectividad de la tierra aumentando la radiación solar de onda corta que se refleja en el espacio, lo que se denomina gestión de la radiación solar, o mejorando la radiación de onda larga que emiten las superficies terrestres al espacio, lo que se denomina gestión de la radiación terrestre (Lawrence et al. 2018).

Figura N° 4. Principales tecnologías de geoingeniería de forzamiento radiativo que tienen como objetivo alterar el presupuesto de energía radiativa de la tierra para estabilizar o reducir las temperaturas globales.



Estas tecnologías incluyen la inyección de aerosoles estratosféricos, el brillo del cielo marino, el adelgazamiento de cirros, los espejos espaciales y el brillo basado en la superficie.

Inyección de aerosol estratosférico

Smith et al. investigaron las tácticas y los costos de la tecnología durante los primeros 15 años de implementación a partir de 2033. Examinaron las posibles técnicas de implementación y concluyeron que un sistema de entrega basado en aeronaves es el método más eficiente para implementar la inyección de aerosoles estratosféricos. Sin embargo, será necesario desarrollar un nuevo avión de gran altitud especialmente diseñado para este propósito, ya que los modelos actuales, incluso con modificaciones, no serán suficientes (2018).

Es importante tener en cuenta que, si bien este enfoque proporcionará una reducción temporal de la temperatura, no debe considerarse una solución a largo plazo. Este enfoque aún se encuentra en una etapa muy temprana de investigación y desarrollo (Lawrence et al. 2018).

Aclaramiento del cielo marino

El brillo del cielo marino, también conocido como brillo de las nubes marinas o mejora del albedo de las nubes, es otra tecnología de gestión de la radiación solar que tiene como objetivo mantener o reducir las temperaturas globales mejorando la reflectividad de las nubes (Zhang et al. 2015).

La idea principal detrás de esta técnica es que el agua de mar se rocía en el aire creando pequeñas gotas que se evaporan fácilmente dejando cristales de sal que aumentan la reflectividad de las nubes de baja altitud sobre los océanos (Ming et al. 2014). El efecto de enfriamiento potencial se ha estimado entre 0,8 y 5,4 W/m², debido a la incertidumbre, el conocimiento limitado y las consideraciones espaciales (Lawrence et al. 2018).

Si bien esta técnica parece simple y directa, Latham et al. destacó una serie de problemas asociados con el aclaramiento del cielo marino. Esto

incluye la falta de un sistema de rociado que sea capaz de generar partículas de agua de mar del tamaño y las cantidades requeridas, así como otros problemas técnicos asociados con el resultado físico de este enfoque como resultado de la naturaleza compleja de las características de las nubes. Otro desafío sería realizar ensayos extensos y comprender y superar adecuadamente los posibles efectos secundarios (Latham et al. 2012). Nuevamente, este enfoque aún se encuentra en una etapa inicial y requerirá una extensa investigación de campo y desarrollo para avanzar.

Espejos basados en el espacio

La protección solar con espejos espaciales es una técnica de gestión de la radiación solar discutida en la literatura que tiene como objetivo reflejar parte de la radiación solar entrante para reducir las temperaturas globales. Para que este enfoque se implemente técnicamente, los espejos o reflectores espaciales deben transportarse en órbita alrededor de la tierra o colocarse en la ubicación Lagrangiana L1 entre la tierra y el sol, donde los campos gravitatorios están en equilibrio permitiendo que los reflectores permanezcan estacionarios (Zhang et al. 2015).

Si bien este enfoque puede tener un efecto de enfriamiento considerable basado en simulaciones de modelos, el desarrollo de dicha tecnología aún se encuentra en una etapa muy temprana. El principal inconveniente asociado con este enfoque es la viabilidad económica de transportar materiales al espacio. Para que esta tecnología sea económicamente factible, los costos de transporte de materiales deben reducirse de aproximadamente \$10 000/kg a menos de \$100/kg (Lawrence et al. 2018). Además, los riesgos como los asociados con los desechos espaciales y las colisiones de asteroides o los asociados con fallas técnicas y de comunicación deben ser atendidos adecuadamente (Lawrence et al. 2018).

Brillo basado en superficies

Otro enfoque de gestión de la radiación solar discutido en la literatura es el aumento del brillo de la superficie terrestre para aumentar el albedo de la tierra y así reducir las temperaturas globales. Esto se ha sugerido pintando los techos urbanos y las carreteras de blanco, así como cubriendo los desiertos y los glaciares con láminas de plástico altamente reflectantes y, además, colocando paneles flotantes reflectantes sobre los cuerpos de agua (Ming et al. 2014).

Según Lawrence et al., basado en una extensa revisión de la literatura, el potencial de enfriamiento de este enfoque es demasiado limitado. Además, se asocian efectos secundarios negativos sustanciales, como la alteración de los ecosistemas del desierto (Lawrence et al. 2018).

Adelgazamiento de cirros

El adelgazamiento de nubes cirrus es una técnica de gestión de la radiación terrestre que tiene como objetivo aumentar la radiación de onda larga que se emite desde la superficie de la tierra al espacio para estabilizar o reducir las temperaturas globales. Los cirros son nubes de hielo a gran altura que desempeñan un papel importante en el balance de radiación de la Tierra, y tienen un impacto en el ciclo hidrológico de la Tierra, así como en las temperaturas de la superficie. Los cirros absorben la radiación terrestre y reflejan la radiación solar entrante; sin embargo, en general, inducen un efecto de calentamiento neto promedio a partir del desequilibrio entre los forzamientos radiativos entrantes y salientes (Kärcher 2017).

El principio básico de esta técnica es la inyección de aerosoles en los cirros para reducir su espesor óptico, así como su vida útil para aumentar la emisión de radiación terrestre al espacio. Este enfoque requeriría una inyección regular en la nube, por lo que un método de entrega eficiente y

rentable debe estar en lugares como aviones o drones dedicados. Triioduro de bismuto (BiI₃) se ha propuesto como un material eficaz para sembrar nubes; sin embargo, es necesario tener en cuenta su toxicidad. La sal marina es otra opción propuesta, pero no se ha encontrado que sea tan efectiva como BiI₃ (Lawrence et al. 2018).

Según las simulaciones del modelo, se ha estimado que el efecto de enfriamiento máximo a través de este enfoque está en el rango de 2 a 3,5 W/m² (Lawrence et al. 2018). Según Lawrence et al., no hay costos publicados para el adelgazamiento de las nubes cirros y este enfoque aún requiere más investigación para comprender los efectos secundarios, así como para realizar la investigación adecuada sobre los posibles métodos de administración (Lawrence et al. 2018).

Técnicas diversas de gestión de la radiación

Ming et al. propuso varias tecnologías teóricas que apuntan a la radiación terrestre, principalmente mediante la creación de puentes térmicos para evitar la capa aislante de gases de efecto invernadero y poder transferir la radiación térmica al espacio. El trabajo de investigación presentó varios conceptos que incluyen la transferencia de aire caliente superficial a la troposfera, la transferencia de calor latente y sensible a la parte superior de la troposfera, la transferencia de calor superficial sensible a la troposfera, así como la transferencia de aire frío a la superficie terrestre.

Para cada concepto se proponen tecnologías conceptuales. Algunas de las tecnologías discutidas son sistemas que transfieren calor más allá del sistema terrestre mientras generan energía, denominados reactores meteorológicos por los autores (Ming et al. 2014). Si bien la idea de los puentes térmicos es interesante, las tecnologías y los conceptos presentados requieren más investigación, desarrollo y extensas pruebas de campo.

V. CONCLUSIONES

Las conclusiones de la investigación fueron las siguientes:

1. Las tecnologías de emisiones negativas, por otro lado, brindan una solución sólida en combinación con los esfuerzos actuales de descarbonización. Si bien es posible que algunas de las tecnologías de emisiones negativas presentadas en la revisión de la literatura aún se encuentren en una etapa temprana de desarrollo, las técnicas de secuestro basadas en la biogenia están hasta cierto punto maduras y pueden implementarse de inmediato.
2. El desafío en este momento es que el precio del carbono para las emisiones negativas se encuentra en una etapa muy temprana, principalmente disponible a través de mercados voluntarios para un número muy pequeño de métodos de eliminación de carbono y técnicamente inexistente para la mayoría de las tecnologías discutidas. Actualmente, el precio del carbono sería insuficiente para sostener económicamente los proyectos de eliminación de carbono, aparte del marco existente para los proyectos de forestación y reforestación. A medida que los mercados de carbono maduren y ofrezcan incentivos para la eliminación de carbono, esto puede cambiar en un futuro próximo.
3. En este momento, los proyectos de secuestro biogénico se encuentran en una buena posición para utilizar de manera eficiente los recursos financieros y el apoyo de políticas, ya que la mayoría de las tecnologías relacionadas se pueden implementar de inmediato; sin embargo, es necesario desarrollar e introducir enérgicamente mecanismos eficientes de fijación de precios del carbono que se centren en la eliminación de carbono. Además, la financiación de la investigación y el desarrollo tecnológico también es un aspecto muy importante para avanzar.

VI. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones para futuras investigaciones son las siguientes:

1. Ampliar la investigación científica con una muestra más amplia de documentos a evaluar. R Con base en el estado actual de emergencia climática, el desarrollo inmediato de mecanismos viables de mitigación y adaptación es de extrema importancia.
2. Es importante aclarar que no existe una solución definitiva para abordar el cambio climático y que se deben implementar todas las tecnologías y técnicas discutidas en esta revisión, si son técnica y económicamente viables.
3. Las tecnologías que se implementarán aún deben desarrollarse y probarse y los efectos secundarios deben abordarse adecuadamente, lo que puede ser un proceso largo.
4. La captura de CO₂ a través de la fotosíntesis es un proceso sencillo y sólido; sin embargo, debe integrarse efectivamente dentro de un marco tecnológico como se presenta en la revisión.
5. Para impulsar agresivamente los proyectos de emisiones negativas, los formuladores de políticas y los gobiernos deben diseñar instrumentos de políticas apropiados y marcos de apoyo con un enfoque especial en la tarificación del carbono.
6. La industria financiera debe brindar mayor apoyo financiero y accesibilidad, así como introducir mecanismos eficientes basados en el mercado para incentivar a los desarrolladores de proyectos a establecer proyectos de eliminación de carbono.

REFERENCIAS

- ABDULLA, A., VAISHNAV, P., SERGI, B. y VICTOR, D.G., 2019. Limits to deployment of nuclear power for decarbonization: Insights from public opinion. *Energy Policy* [en línea], vol. 129, no. March, pp. 1339-1346. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2019.03.039. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.039>.
- AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA, 2019a. Informe de seguimiento: CCUS en el poder. [en línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/tcep/power/ccus>.
- AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA, 2019b. Seguimiento del transporte. *A/E* [en línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2019>.
- AGOSTINI, F., GREGORY, A.S. y RICHTER, G.M., 2015. Carbon Sequestration by Perennial Energy Crops: Is the Jury Still Out? *Bioenergy Research* [en línea], vol. 8, no. 3, pp. 1057-1080. ISSN 19391242. DOI 10.1007/s12155-014-9571-0. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9571-0>.
- ANCRE, 2015. Decarbonization Wedges. [en línea]. Paris: Disponible en: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3040.1360>.
- BACH, L.T., GILL, S.J., RICKABY, R.E.M., GORE, S. y RENFORTH, P., 2019. CO2 Removal With Enhanced Weathering and Ocean Alkalinity Enhancement: Potential Risks and Co-benefits for Marine Pelagic Ecosystems. *Frontiers in Climate* [en línea], vol. 1, no. October. ISSN 26249553. DOI 10.3389/fclim.2019.00007. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00007>.
- BUSTREO, C., GIULIANI, U., MAGGIO, D. y ZOLLINO, G., 2019. How fusion power can contribute to a fully decarbonized European power mix after 2050. *Fusion Engineering and Design* [en línea], vol. 146, no. March, pp. 2189-2193. ISSN 09203796. DOI 10.1016/j.fusengdes.2019.03.150. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.150>.

- CHEN, H., OSMAN, A.I., MANGWANDI, C. y ROONEY, D., 2019. Upcycling food waste digestate for energy and heavy metal remediation applications. *Resources, Conservation and Recycling: X* [en línea], vol. 3, no. May, pp. 100015. ISSN 2590289X. DOI 10.1016/j.rcrx.2019.100015. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100015>.
- CMNUCC, 2006. *Informe de la convergencia de las partes que actúan como reunión de las partes del protocolo de kyoto en su primera sesión*. [en línea]. 2006. S.l.: s.n. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/2005/cmp1/eng/08a02.pdf#page=23>.
- DE KLEIN, J.J.M. y VAN DER WERF, A.K., 2014. Balancing carbon sequestration and GHG emissions in a constructed wetland. *Ecological Engineering* [en línea], vol. 66, pp. 36-42. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2013.04.060. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.060>.
- DE OLIVEIRA GARCIA, W., AMANN, T., HARTMANN, J., KARSTENS, K., POPP, A., BOYSEN, L.R., SMITH, P. y GOLL, D., 2020. Impacts of enhanced weathering on biomass production for negative emission technologies and soil hydrology. *Biogeosciences* [en línea], vol. 17, no. 7, pp. 2107-2133. ISSN 17264189. DOI 10.5194/bg-17-2107-2020. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/bg-2019-386>.
- EDENHOFER, O., PICHS-MADRUGA, R., SOKONA MALI, Y., KADNER, S., MINX, J.C., BRUNNER, S., AGRAWALA, S., BAIOCCHI, G.U., ALEXEYEVICH BASHMAKOV, I., BLANCO, G. y BROOME, J., 2014. *Cambio climático 2014: mitigación del cambio climático. Contribución del grupo de trabajo III al quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático* [en línea]. 2014. New York: Cambridge University Press. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_technical-summary.pdf.
- ERNSTING, A., SMOLKER, R. y PAUL, H., 2011. Biochar and carbon markets. *Biofuels* [en línea], vol. 2, no. 1, pp. 9-12. ISSN 17597269. DOI 10.4155/bfs.10.78. Disponible en: <https://doi.org/10.4155/bfs.10.78>.

- FAJARDY, M., PATRIZIO, P., DAGGASH, H.A. y MAC DOWELL, N., 2019. Negative Emissions: Priorities for Research and Policy Design. *Frontiers in Climate* [en línea], vol. 1, no. October, pp. 1-7. ISSN 26249553. DOI 10.3389/fclim.2019.00006. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00006>.
- FAROOQI, Z.U.R., SABIR, M., ZEESHAN, N., NAVEED, K. y HUSSAIN, M.M., 2018. Enhancing Carbon Sequestration Using Organic Amendments and Agricultural Practices. *Carbon Capture, Utilization and Sequestration* [en línea], DOI 10.5772/intechopen.79336. Disponible en: [10.5772/intechopen.79336](https://doi.org/10.5772/intechopen.79336).
- FUSS, S., LAMB, W.F., CALLAGHAN, M.W., HILAIRE, J., CREUTZIG, F., AMANN, T., BERINGER, T., DE OLIVEIRA GARCIA, W., HARTMANN, J., KHANNA, T., LUDERER, G., NEMET, G.F., ROGELJ, J., SMITH, P., VICENTE, J.V., WILCOX, J., DEL MAR ZAMORA DOMINGUEZ, M. y MINX, J.C., 2018. Negative emissions - Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* [en línea], vol. 13, no. 6, pp. 2016-2050. ISSN 17489326. DOI 10.1088/1748-9326/aabf9f. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f>.
- GALINA, N.R., ARCE, G.L.A.F. y ÁVILA, I., 2019. Evolution of carbon capture and storage by mineral carbonation: Data analysis and relevance of the theme. *Minerals Engineering* [en línea], vol. 142, no. July, pp. 105879. ISSN 08926875. DOI 10.1016/j.mineng.2019.105879. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105879>.
- GAMBHIR, A. y TAVONI, M., 2019. Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation. *One Earth* [en línea], vol. 1, no. 4, pp. 405-409. ISSN 25903322. DOI 10.1016/j.oneear.2019.11.006. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.11.006>.
- GAO, S., LI, M.Y., DUAN, M.S. y WANG, C., 2019. International carbon markets under the Paris Agreement: Basic form and development prospects. *Advances in Climate Change Research* [en línea], vol. 10, no. 1, pp. 21-29. ISSN 16749278. DOI 10.1016/j.accre.2019.03.001. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2019.03.001>.

- GASSER, T., GUIVARCH, C., TACHIIRI, K., JONES, C.D. y CIAIS, P., 2015. Negative emissions physically needed to keep global warming below 2°C. *Nature Communications* [en línea], vol. 6. ISSN 20411723. DOI 10.1038/ncomms8958. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/ncomms8958>.
- GI, K., SANO, F., AKIMOTO, K., HIWATARI, R. y TOBITA, K., 2020. Potential contribution of fusion power generation to low-carbon development under the Paris Agreement and associated uncertainties. *Energy Strategy Reviews* [en línea], vol. 27, no. November 2019, pp. 100432. ISSN 2211467X. DOI 10.1016/j.esr.2019.100432. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100432>.
- GOGLIO, P., WILLIAMS, A.G., BALTA-OZKAN, N., HARRIS, N.R.P., WILLIAMSON, P., HUISINGH, D., ZHANG, Z. y TAVONI, M., 2020. Advances and challenges of life cycle assessment (LCA) of greenhouse gas removal technologies to fight climate changes. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 244. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.118896. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118896>.
- GREN, I.M. y ZELEKE, A.A., 2016. Policy design for forest carbon sequestration: A review of the literature. *Forest Policy and Economics* [en línea], vol. 70, pp. 128-136. ISSN 13899341. DOI 10.1016/j.forpol.2016.06.008. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2016.06.008>.
- HANSSON, A., FRIDAHL, M., HAIKOLA, S., YANDA, P., PAULINE, N. y MABHUYE, E., 2020. Preconditions for bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) in sub-Saharan Africa: the case of Tanzania. *Environment, Development and Sustainability* [en línea], vol. 22, no. 7, pp. 6851-6875. ISSN 15732975. DOI 10.1007/s10668-019-00517-y. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00517-y>.

- HARPER, A.B., POWELL, T., COX, P.M., HOUSE, J., HUNTINGFORD, C., LENTON, T.M., SITCH, S., BURKE, E., CHADBURN, S.E., COLLINS, W.J., COMYN-PLATT, E., DAI OGLOU, V., DOELMAN, J.C., HAYMAN, G., ROBERTSON, E., VAN VUUREN, D., WILTSHIRE, A., WEBBER, C.P., BASTOS, A., BOYSEN, L., CIAIS, P., DEVARAJU, N., JAIN, A.K., KRAUSE, A., POULTER, B. y SHU, S., 2018. Land-use emissions play a critical role in land-based mitigation for Paris climate targets. *Nature Communications* [en línea], vol. 9, no. 1. ISSN 20411723. DOI 10.1038/s41467-018-05340-z. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05340-z>.
- HECK, V., GERTEN, D., LUCHT, W. y POPP, A., 2018. Biomass-based negative emissions difficult to reconcile with planetary boundaries. *Nature Climate Change* [en línea], vol. 8, no. 2, pp. 151-155. ISSN 17586798. DOI 10.1038/s41558-017-0064-y. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-017-0064-y>.
- HEIN, J., GUARIN, A., FROMMÉ, E. y PAUW, P., 2018. Deforestation and the Paris climate agreement: An assessment of REDD + in the national climate action plans. *Forest Policy and Economics* [en línea], vol. 90, no. November 2017, pp. 7-11. ISSN 13899341. DOI 10.1016/j.forpol.2018.01.005. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.01.005>.
- HOUSE, K.Z., HOUSE, C.H., SCHRAG, D.P. y AZIZ, M.J., 2009. Electrochemical acceleration of chemical weathering for carbon capture and sequestration. *Energy Procedia* [en línea], vol. 1, no. 1, pp. 4953-4960. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2009.02.327. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.327>.
- IPCC, 2013. *IPCC Factsheet: What is the IPCC?* [en línea]. 2013. S.l.: s.n. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/FS_what_ipcc.pdf.

- IPCC, 2018. *Un informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales y las vías de emisión de gases de efecto invernadero relacionadas* [en línea]. 2018. S.l.: s.n. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf.
- KANTOLA, I.B., MASTERS, M.D., BEERLING, D.J., LONG, S.P. y DELUCIA, E.H., 2017. Potential of global croplands and bioenergy crops for climate change mitigation through deployment for enhanced weathering. *Biology Letters* [en línea], vol. 13, no. 4. ISSN 1744957X. DOI 10.1098/rsbl.2016.0714. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0714>.
- KÄRCHER, B., 2017. Cirrus Clouds and Their Response to Anthropogenic Activities. *Current Climate Change Reports* [en línea], vol. 3, no. 1, pp. 45-57. ISSN 21986061. DOI 10.1007/s40641-017-0060-3. Disponible en: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40641-017-0060-3.pdf>.
- KHESHGI, H.S., 1995. Sequestering atmospheric carbon dioxide by increasing ocean alkalinity. *Energy* [en línea], vol. 20, no. 9, pp. 915-922. ISSN 03605442. DOI 10.1016/0360-5442(95)00035-F. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(95\)00035-F](https://doi.org/10.1016/0360-5442(95)00035-F).
- KIM, J. y PARK, K., 2016. Financial development and deployment of renewable energy technologies. *Energy Economics* [en línea], vol. 59, pp. 238-250. ISSN 01409883. DOI 10.1016/j.eneco.2016.08.012. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2016.08.012>.
- LATHAM, J., BOWER, K., CHOULARTON, T., COE, H., CONNOLLY, P., COOPER, G., CRAFT, T., FOSTER, J., GADIAN, A., GALBRAITH, L., IACOVIDES, H., JOHNSTON, D., LAUNDER, B., LESLIE, B., MEYER, J., NEUKERMANS, A., ORMOND, B., PARKES, B., RASCH, P., RUSH, J., SALTER, S., STEVENSON, T., WANG, H., WANG, Q. y WOOD, R., 2012. Marine cloud brightening. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [en línea], vol. 370, no. 1974, pp. 4217-4262. ISSN 1364503X. DOI 10.1098/rsta.2012.0086. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0086>.

- LAWRENCE, M.G., SCHÄFER, S., MURI, H., SCOTT, V., OSCHLIES, A., VAUGHAN, N.E., BOUCHER, O., SCHMIDT, H., HAYWOOD, J. y SCHEFFFRAN, J., 2018. Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nature Communications* [en línea], vol. 9, no. 1. ISSN 20411723. DOI 10.1038/s41467-018-05938-3. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>.
- LEFEBVRE, D., GOGLIO, P., WILLIAMS, A., MANNING, D.A.C., DE AZEVEDO, A.C., BERGMANN, M., MEERSMANS, J. y SMITH, P., 2019. Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: A case study for Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 233, pp. 468-481. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.06.099. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.099>.
- LEIBOWICZ, B.D., LANHAM, C.M., BROZYNSKI, M.T., VÁZQUEZ-CANTELI, J.R., CASTEJÓN, N.C. y NAGY, Z., 2018. Optimal decarbonization pathways for urban residential building energy services. *Applied Energy* [en línea], vol. 230, no. May, pp. 1311-1325. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2018.09.046. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.046>.
- LENZI, D., 2018. The ethics of negative emissions. *Global Sustainability* [en línea], vol. 1. ISSN 20594798. DOI 10.1017/sus.2018.5. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/sus.2018.5>.
- LIN, A.C., 2018. Carbon Dioxide Removal after Paris. *Ecology Law Quarterly* [en línea], vol. 45, no. 3, pp. 533-582. ISSN 0046-1121. DOI 10.15779/Z386M3340F. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15779/Z386M3340F>.
- LOCKLEY, A., MI, Z. y COFFMAN, D., 2019. Geoengineering and the blockchain: Coordinating Carbon Dioxide Removal and Solar Radiation Management to tackle future emissions. *Frontiers of Engineering Management* [en línea], vol. 6, no. 1, pp. 38-51. ISSN 2095-7513. DOI 10.1007/s42524-019-0010-y. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s42524-019-0010-y>.

- MA, X., ZHANG, X. y TIAN, D., 2020. Farmland degradation caused by radial diffusion of CO₂ leakage from carbon capture and storage. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 255, pp. 120059. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.120059. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120059>.
- MANDER, S., ANDERSON, K., LARKIN, A., GOUGH, C. y VAUGHAN, N., 2017. The Role of Bio-energy with Carbon Capture and Storage in Meeting the Climate Mitigation Challenge: A Whole System Perspective. *Energy Procedia* [en línea], vol. 114, no. November 2016, pp. 6036-6043. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2017.03.1739. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1739>.
- MATHY, S., MENANTEAU, P. y CRIQUI, P., 2018. After the Paris Agreement: Measuring the Global Decarbonization Wedges From National Energy Scenarios. *Ecological Economics* [en línea], vol. 150, no. January, pp. 273-289. ISSN 09218009. DOI 10.1016/j.ecolecon.2018.04.012. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.012>.
- MICHALSKI, J., POLTRUM, M. y BÜNGER, U., 2019. The role of renewable fuel supply in the transport sector in a future decarbonized energy system. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], vol. 44, no. 25, pp. 12554-12565. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2018.10.110. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.110>.
- MING, T., DE RICHTER, R., LIU, W. y CAILLOL, S., 2014. Fighting global warming by climate engineering: Is the Earth radiation management and the solar radiation management any option for fighting climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 31, pp. 792-834. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2013.12.032. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.032>.
- NAKAJIMA, T., YAMADA, T., ANZOUA, K.G., KOKUBO, R. y NOBORIO, K., 2018. Carbon sequestration and yield performances of *Miscanthus x giganteus* and *Miscanthus sinensis*. *Carbon Management* [en línea], vol. 9, no. 4, pp. 415-423. ISSN 17583012. DOI 10.1080/17583004.2018.1518106. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1518106>.

- NIETO, J., CARPINTERO, Ó. y MIGUEL, L.J., 2018. Less than 2 °C? An Economic-Environmental Evaluation of the Paris Agreement. *Ecological Economics* [en línea], vol. 146, no. November 2016, pp. 69-84. ISSN 09218009. DOI 10.1016/j.ecolecon.2017.10.007. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.10.007>.
- ONI, B.A., OZIEGBE, O. y OLAWOLE, O.O., 2019. Importancia de la aplicación de biocarbón para el medio ambiente y la economía. *Annals of Agricultural Sciences* [en línea], vol. 64, no. 2, pp. 222-236. ISSN 05701783. DOI 10.1016/j.aosas.2019.12.006. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2019.12.006>.
- ONU, 2015. *The paris agreement* [en línea]. 2015. S.l.: s.n. ISBN 9781000750713. Disponible en: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf.
- ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, 2018. *Informe anual del OIEA 2018* [en línea]. 2018. S.l.: s.n. Disponible en: www.iaea.org.
- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, 1979. *Actas de la conferencia mundial sobre el clima: una conferencia de expertos sobre el clima y la humanidad* [en línea]. 1979. S.l.: s.n. Disponible en: https://library.wmo.int/doc_num.php%3Fexplnum_id%3D8346.
- ØSTERGAARD, P.A., DUIC, N., NOOROLLAHI, Y., MIKULCIC, H. y KALOGIROU, S., 2020. Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable Energy* [en línea], vol. 146, pp. 2430-2437. ISSN 18790682. DOI 10.1016/j.renene.2019.08.094. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>.
- PERDAN, S. y AZAPAGIC, A., 2011. Carbon trading: Current schemes and future developments. *Energy Policy* [en línea], vol. 39, no. 10, pp. 6040-6054. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2011.07.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.003>.
- PFEIFFER, B. y MULDER, P., 2013. Explaining the diffusion of renewable energy technology in developing countries. *Energy Economics* [en línea], vol. 40, pp. 285-296. ISSN 01409883. DOI 10.1016/j.eneco.2013.07.005. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2013.07.005>.

- PINDILLI, E., SLEETER, R. y HOGAN, D., 2018. Estimating the Societal Benefits of Carbon Dioxide Sequestration Through Peatland Restoration. *Ecological Economics* [en línea], vol. 154, no. November 2017, pp. 145-155. ISSN 09218009. DOI 10.1016/j.ecolecon.2018.08.002. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.08.002>.
- PIRES, J.C.M., 2019. Negative emissions technologies: A complementary solution for climate change mitigation. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 672, pp. 502-514. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.04.004. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.004>.
- PITELIS, A., VASILAKOS, N. y CHALVATZIS, K., 2020. Fostering innovation in renewable energy technologies: Choice of policy instruments and effectiveness. *Renewable Energy* [en línea], vol. 151, pp. 1163-1172. ISSN 18790682. DOI 10.1016/j.renene.2019.11.100. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.100>.
- PNUMA, 2019. *Informe de brecha de emisiones. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente* [en línea]. 2019. Nairobi: s.n. ISBN 9789280737660. Disponible en: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30797/EGR2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- POURHASHEM, G., HUNG, S.Y., MEDLOCK, K.B. y MASIELLO, C.A., 2019. Policy support for biochar: Review and recommendations. *GCB Bioenergy* [en línea], vol. 11, no. 2, pp. 364-380. ISSN 17571707. DOI 10.1111/gcbb.12582. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12582>.
- PRĂVĂLIE, R. y BANDOC, G., 2018. Nuclear energy: Between global electricity demand, worldwide decarbonisation imperativeness, and planetary environmental implications. *Journal of Environmental Management* [en línea], vol. 209, pp. 81-92. ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2017.12.043. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.043>.

- QIN, Z., CHEN, J., XIE, X., LUO, X., SU, T. y JI, H., 2020. CO₂ reforming of CH₄ to syngas over nickel-based catalysts. *Environmental Chemistry Letters* [en línea], vol. 18, no. 4, pp. 997-1017. ISSN 16103661. DOI 10.1007/s10311-020-00996-w. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00996-w>.
- REN21, 2019. *Energías renovables 2019: informe de estado global* [en línea]. 2019. S.l.: s.n. ISBN 9783981891140. Disponible en: http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR2011.pdf.
- RENFORTH, P., 2019. The negative emission potential of alkaline materials. *Nature Communications* [en línea], vol. 10, no. 1. ISSN 20411723. DOI 10.1038/s41467-019-09475-5. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-09475-5>.
- RENFORTH, P. y HENDERSON, G., 2017. Assessing ocean alkalinity for carbon sequestration. *Reviews of Geophysics* [en línea], vol. 55, no. 3, pp. 636-674. ISSN 19449208. DOI 10.1002/2016RG000533. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/2016RG000533>.
- RICKE, K.L., MILLAR, R.J. y MACMARTIN, D.G., 2017. Constraints on global temperature target overshoot. *Scientific Reports* [en línea], vol. 7, no. 1, pp. 1-7. ISSN 20452322. DOI 10.1038/s41598-017-14503-9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-14503-9>.
- SCHMIDT, H.P., ANCA-COUCÉ, A., HAGEMANN, N., WERNER, C., GERTEN, D., LUCHT, W. y KAMMANN, C., 2019. Pyrogenic carbon capture and storage. *GCB Bioenergy* [en línea], vol. 11, no. 4, pp. 573-591. ISSN 17571707. DOI 10.1111/gcbb.12553. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12553>.
- SEETHARAMAN, MOORTHY, K., PATWA, N., SARAVANAN y GUPTA, Y., 2019. Breaking barriers in deployment of renewable energy. *Heliyon* [en línea], vol. 5, no. 1, pp. e01166. ISSN 24058440. DOI 10.1016/j.heliyon.2019.e01166. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01166>.

- SEMIDA, W.M., BEHEIRY, H.R., SÉTAMOU, M., SIMPSON, C.R., ABD EL-MAGEED, T.A., RADY, M.M. y NELSON, S.D., 2019. Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. *South African Journal of Botany* [en línea], vol. 127, pp. 333-347. ISSN 02546299. DOI 10.1016/j.sajb.2019.11.015. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.11.015>.
- SHIVAKUMAR, A., DOBBINS, A., FAHL, U. y SINGH, A., 2019. Drivers of renewable energy deployment in the EU: An analysis of past trends and projections. *Energy Strategy Reviews* [en línea], vol. 26, no. January 2018, pp. 100402. ISSN 2211467X. DOI 10.1016/j.esr.2019.100402. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100402>.
- SINSEL, S.R., RIEMKE, R.L. y HOFFMANN, V.H., 2020. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. *Renewable Energy* [en línea], vol. 145, pp. 2271-2285. ISSN 18790682. DOI 10.1016/j.renene.2019.06.147. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>.
- SMITH, W. y WAGNER, G., 2018. Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment. *Environmental Research Letters* [en línea], vol. 13, no. 12. ISSN 17489326. DOI 10.1088/1748-9326/aae98d. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aae98d>.
- SRIVASTAVA, R.K., SHETTI, N.P., REDDY, K.R. y AMINABHAVI, T.M., 2020. Biofuels, biodiesel and biohydrogen production using bioprocesses. A review. *Environmental Chemistry Letters* [en línea], vol. 18, no. 4, pp. 1049-1072. ISSN 16103661. DOI 10.1007/s10311-020-00999-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00999-7>.
- STREFLER, J., AMANN, T., BAUER, N., KRIEGLER, E. y HARTMANN, J., 2018. Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters* [en línea], vol. 13, no. 3. ISSN 17489326. DOI 10.1088/1748-9326/aaa9c4. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c4>.

- TCVETKOV, P., CHEREPOVITSYN, A. y FEDOSEEV, S., 2019. Public perception of carbon capture and storage: A state-of-the-art overview. *Heliyon* [en línea], vol. 5, no. 12, pp. e02845. ISSN 24058440. DOI 10.1016/j.heliyon.2019.e02845. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02845>.
- THE ROYAL SOCIETY, 2018. *Greenhouse gas removal* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 9781782523499. Disponible en: www.royalsociety.org/greenhouse-gas-removal.
- UNCC SECRETARIAT, 2019. *Climate action and support trends* [en línea]. 2019. S.l.: s.n. Disponible en: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Climate_Action_Support_Trends_2019.pdf.
- UNFCCC, 1997. *United Nations Framework on Climate Change Kyoto Protocol* [en línea]. 1997. S.l.: s.n. Disponible en: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/l07a01.pdf>.
- UNFCCC, 2008. *Manual de referencia del protocolo de Kioto sobre contabilidad de emisiones y cantidad asignada* [en línea]. 2008. S.l.: s.n. ISBN 92-9219-055-5. Disponible en: https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf.
- UNFCCC, 2012. *Kyoto protocol and amendent at doha* [en línea]. 2012. S.l.: s.n. Disponible en: <https://treaties.un.org/doc/Publication/CN/2012/CN.718.2012-Eng.pdf>.
- UNITED NATIONS, 1992. *United Nations Framework Convention on Climate Change* [en línea]. 1992. S.l.: s.n. Disponible en: https://treaties.un.org/pages/ViewDetailsIII.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7&chapter=27&Temp=mtdsg3&clang=_en.
- VILLA, J.A. y BERNAL, B., 2018. Carbon sequestration in wetlands, from science to practice: An overview of the biogeochemical process, measurement methods, and policy framework. *Ecological Engineering* [en línea], vol. 114, pp. 115-128. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2017.06.037. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.037>.

- VILLORIA-SÁEZ, P., TAM, V.W.Y., RÍO MERINO, M. del, VIÑAS ARREBOLA, C. y WANG, X., 2016. Effectiveness of greenhouse-gas Emission Trading Schemes implementation: a review on legislations. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 127, pp. 49-58. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.03.148. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.148>.
- VINCA, A., ROTTOLI, M., MARANGONI, G. y TAVONI, M., 2018. The role of carbon capture and storage electricity in attaining 1.5 and 2 °C. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [en línea], vol. 78, no. July, pp. 148-159. ISSN 17505836. DOI 10.1016/j.ijggc.2018.07.020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.07.020>.
- WANG, B., PAN, Z., CHENG, H., GUAN, Y., ZHANG, Z. y CHENG, F., 2020. CO₂ sequestration: high conversion of gypsum into CaCO₃ by ultrasonic carbonation. *Environmental Chemistry Letters* [en línea], vol. 18, no. 4, pp. 1369-1377. ISSN 16103661. DOI 10.1007/s10311-020-00997-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00997-9>.
- WANG, Q., HUBACEK, K., FENG, K., WEI, Y.M. y LIANG, Q.M., 2016. Distributional effects of carbon taxation. *Applied Energy* [en línea], vol. 184, pp. 1123-1131. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.06.083. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.083>.
- WENDLING, Z.A., 2019. Bridges beyond renewable energy: Decarbonizing the global electricity sector under uncertainty. *Energy Research and Social Science* [en línea], vol. 48, no. August 2017, pp. 235-245. ISSN 22146296. DOI 10.1016/j.erss.2018.09.020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.09.020>.
- XIAO, L., LIU, F., XU, H., FENG, D., LIU, J. y HAN, G., 2019. Biochar promotes methane production at high acetate concentrations in anaerobic soils. *Environmental Chemistry Letters* [en línea], vol. 17, no. 3, pp. 1347-1352. ISSN 16103661. DOI 10.1007/s10311-019-00863-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00863-3>.

- YUE, X.L. y GAO, Q.X., 2018. Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. *Advances in Climate Change Research* [en línea], vol. 9, no. 4, pp. 243-252. ISSN 16749278. DOI 10.1016/j.accre.2018.12.003. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.12.003>.
- ZHANG, Z., MOORE, J.C., HUISINGH, D. y ZHAO, Y., 2015. Review of geoengineering approaches to mitigating climate change. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 103, pp. 898-907. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.09.076. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.076>.