

Dióxido de carbono, sus dos caras

Maribel Arroyo y Armando Ramírez-Monroy

Resumen: Debido al calentamiento global, la sociedad ha centrado su atención en el incremento de dióxido de carbono en la atmósfera como el principal gas de efecto invernadero responsable del cambio climático, principalmente por actividades antropogénicas y particularmente por la combustión de materiales fósiles. Sin embargo, hasta cierto límite la presencia del dióxido de carbono en la atmósfera es necesaria para mantener la temperatura óptima del planeta y es la materia prima de las plantas verdes para realizar la fotosíntesis que produce el oxígeno necesario para la supervivencia de la humanidad, entonces ¿es el dióxido de carbono perverso o un benefactor?

Palabras clave: Dióxido de carbono, fotosíntesis, efecto invernadero, emisiones antropogénicas, utilización de CO₂.

Abstract: Due to global warming, society has focused its attention on increasing analyze the production of carbon dioxide as the main greenhouse gas responsible for climate change, mainly due to anthropogenic activities and fossil fuel combustion. However, to a certain extent the presence of carbon dioxide in the atmosphere is necessary to maintain the optimal temperature of the planet and is the raw material of green plants to carry out the process of photosynthesis which produces the oxygen necessary for the survival of humanity then, is carbon dioxide a villain or a benefactor?

Keywords: Carbon dioxide, photosynthesis, greenhouse effect, anthropogenic emissions, CO₂ utilization.

INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO₂) es, en condiciones ambientales, un gas inodoro e incoloro que está constituido de un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno unidos por enlaces covalentes. Es producido en los procesos de fermentación, respiración y combustión. Este compuesto químico forma parte de tres sistemas estabilizadores del ciclo del carbono por el cual el carbono se intercambia en la biósfera global: el CO₂ actúa como un

gran *termostato* al impedir la fuga total de la radiación solar que incide en la Tierra, regulando así su temperatura; es un *homeostato del oxígeno atmosférico* (O₂) regulando su concentración a través de la fotosíntesis y de la degradación de la materia orgánica hasta CO₂ e interviene en la regulación del *nivel de pH de los océanos* mediante la formación de ácido carbónico (H₂CO₃) el cual es neutralizado por el carbonato de calcio (CaCO₃) presente en el medio (Figura 1).^[1] Sin embargo, el aumento de CO₂ en la atmósfera conduce a la desestabilización de estos sistemas y está actualmente relacionado con el calentamiento global del planeta, y los mecanismos estabilizadores del ciclo del carbono trabajan demasiado lentamente respecto a las escalas de tiempo de la vida del ser humano por lo que los efectos del calentamiento global durarán tanto como tome a estos procesos actuar, por lo que es inminente que se actúe también al respecto. Se han estudiado diversos mecanismos para la mitigación y aprovechamiento del CO₂ ya que, al ser un gas no tóxico y abundante puede ser empleando para obtener productos de alto valor añadido. Sin embargo, el CO₂ es una molécula inerte por lo que su activación requiere de condiciones de temperatura y presión elevadas o del uso de catalizadores que permiten su transformación en condiciones suaves de reacción.



M. Arroyo



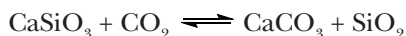
A. Ramírez-Monroy

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Centro de Química del Instituto de Ciencias,
Ciudad Universitaria
Av. San Claudio S/N, Col. San Manuel,
Puebla, 72570, México
C-e: armando.ramirez@correo.buap.mx
sandra.arroyo@correo.buap.mx

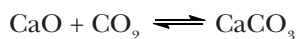
Recibido: 27/02/2020. Aceptado: 16/04/2020.

SISTEMAS ESTABILIZADORES DE LA BIÓSFERA GLOBAL

El mecanismo de termostato dentro del ciclo del carbono estabiliza la temperatura del planeta regulando la concentración de CO_2 en la atmósfera. La composición química más simple de las rocas ígneas es CaSiO_3 , aunque la mayoría de las rocas contienen otros elementos y fórmulas químicas más complicadas. Así, se puede decir que el mecanismo del termostato se basa en la siguiente reacción química:



la cual podría simplificarse a la ecuación siguiente:



Entonces, la química esencial responsable del termostato de CO_2 radica en el desgaste químico del CaO de las rocas ígneas donde el carbono es reclutado como CO_2 atmosférico y finalmente termina en la forma química de CaCO_3 en sedimentos del océano. Es decir, la meteorización química de las rocas actúa como un sumidero de carbono y proporciona una vía para que el carbono salga de la atmósfera y regrese a la Tierra sólida. Cuando la temperatura de la Tierra se eleva aumenta la evaporación de agua a la atmósfera y se generan más lluvias, aumentando así la velocidad de la meteorización química de las rocas. El sumidero de carbono (secuestro de CO_2 de la atmósfera) provocado por el desgaste o deterioro químico de las rocas se equilibra naturalmente por la desgasificación de CO_2 que emerge de la Tierra sólida en forma de gases volcánicos y de fluidos de ventilación hidrotermales de aguas profundas. Si la concentración de CO_2 en la atmósfera fuera demasiado alta, el sumidero de carbono debido a la meteorización consumiría más CO_2 del que podría reponer su fuente volcánica, y la concentración de CO_2 en la atmósfera disminuiría; así, el planeta se enfriaría, ralentizando el ciclo hidrológico y disminuyendo el sumidero de carbono de la meteorización química. Finalmente, después de unos cientos de miles de años, el sumidero por meteorización volvería a equilibrarse con la fuente de CO_2 ^[1] y, evidentemente, por su lentitud, este proceso de equilibración no influye notablemente en los problemas actuales del cambio climático. Por otro lado, el contenido de oxígeno en la atmósfera también es estabilizado por los procesos que se llevan a cabo en la biósfera desde la aparición de las primeras formas multicelulares en la Tierra hace más de 600 millones de años, de tal manera que el aire contiene aproximadamente la misma cantidad de oxígeno desde entonces. Este equilibrio también es muy sensible ya que si el oxígeno disminuyera una décima parte de la concentración que tenemos hoy en día en el aire la vida multicelular acabaría, mientras que si incrementara alrededor de diez veces su concentración actual, incluso

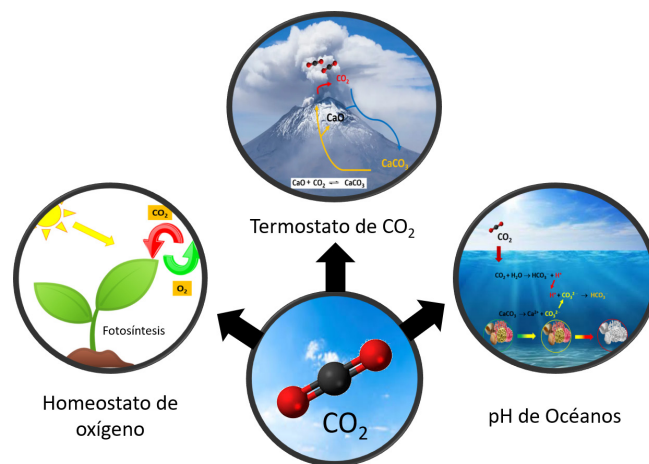
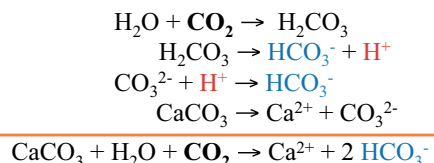


Figura 1. Sistemas estabilizadores del ciclo del carbono en la biósfera global

la madera húmeda ardería y una chispa podría encender un fuego imparable.^[1] El oxígeno (O_2) es producido por el proceso de fotosíntesis que se alimenta de CO_2 y, a la vez, produce buena parte de la materia orgánica de nuestros alimentos y, a lo largo de muchos años, ha generado los combustibles fósiles.

La mayor parte de los compuestos de carbono de las plantas (materia orgánica) se descomponen eventualmente hasta CO_2 y cuando esto ocurre consume la misma cantidad de oxígeno (O_2) que fue producida durante la fotosíntesis, de tal manera que una forma para que el oxígeno se incrementara en la atmósfera sería necesario que la materia orgánica no se degradara y se mantuviera aislada en algún lugar.

La acidez o el pH del océano es también controlada por elementos del ciclo del carbono ya que el CO_2 de la atmósfera sobre el mar se disuelve en el agua y reacciona con las moléculas de agua (H_2O) de las capas superficiales formando ácido carbónico (H_2CO_3) el cual se disocia en protones e iones bicarbonato (H^+ y HCO_3^-) originando que el pH del agua disminuya, es decir, se acidifique; sin embargo, el ion hidrógeno a su vez reacciona con el ion carbonato (CO_3^{2-}) proveniente del carbonato de calcio (CaCO_3) el cual actúa químicamente como una base neutralizando los ácidos, de tal forma que este compuesto se disuelve en medio ácido formando iones bicarbonato (HCO_3^-). Las reacciones implicadas son:



De esta manera el pH o la acidez del océano es controlada por el CaCO_3 disuelto que fluye dentro y fuera de los océanos, sin embargo, este control de pH puede tomar miles de años y uno de los resultados del aumento de CO_2

atmosférico y su consecuente aumento de la acidez de los océanos es que el carbonato de calcio de corales, arrecifes y de las conchas de muchos animales marinos está siendo utilizado en esta reacción de neutralización causando su descalcificación, lo que compromete la vida marina.

INCREMENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN LA ATMÓSFERA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

El dióxido de carbono es un componente natural del aire y un gas de efecto invernadero junto con el vapor de agua, metano, óxido nitroso, clorofluorocarbonos, hexafluoruro de azufre y ozono. Estos componentes atmosféricos retienen parte de la energía que el suelo emite en forma de radiación electromagnética, principalmente de la región infrarroja, después de haber sido calentado por la radiación solar, lo que impide que el calor de la superficie desaparezca notablemente y que la Tierra se enfríe, haciendo posible la vida como la conocemos en el planeta.

Las plantas verdes necesitan el dióxido de carbono, agua y luz solar para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis mediante el cual producen sustancias orgánicas para nutrirse a sí mismas y cuando ellas son ingeridas por animales y humanos éstos también son beneficiados. Al mismo tiempo, los animales y los humanos, además de tener condiciones benéficas de temperatura en el planeta, también necesitan respirar oxígeno (O_2) del aire el cual convierten en dióxido de carbono (CO_2). No obstante, hoy en día el “dióxido de carbono es considerado el mayor causante del cambio climático” debido a su incontrolado y continuo aumento en la atmósfera en los últimos 60 años,^[2] principalmente por medios antropogénicos, lo que aumenta también de manera continua e incontrolada el efecto invernadero. De acuerdo con la versión más reciente del informe especial del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés),^[3] el calentamiento global inducido por el hombre ha aumentado desde la época preindustrial hasta 2017 aproximadamente $1^\circ C$ y el aumento actual es de $0,2^\circ C$ por década. Aunque estos valores parecen ser bajos, hay que tomar en cuenta que los equilibrios arriba discutidos son muy sensibles y con este pequeño aumento de temperatura pueden caer en un desequilibrio ya no controlable por el ser humano. De hecho, el calentamiento global de $1^\circ C$ que hemos alcanzado respecto a los niveles preindustriales provoca graves consecuencias en los ecosistemas y las personas. Por otra parte, los océanos contienen alrededor de 50 veces más CO_2 que la atmósfera y las algas en las capas superiores lo transforman notablemente también a través del proceso de fotosíntesis. Particularmente, el aumento en la concentración de CO_2 en la atmósfera y su alta solubilidad en agua (H_2O), unida a la reacción entre ambos para formar ácido carbónico (H_2CO_3), provocan un aumento de la acidez de los océanos que deriva en alteraciones de los ecosistemas marinos.

Adicionalmente, la fusión de las capas polares de hielo y los glaciares de montaña provocan que el nivel de mar se eleve y que la intensificación de vientos y precipitaciones asociados a ciclones tropicales se agudicen al mismo tiempo que las mareas altas. El deshielo de las regiones de permafrost o “permafrost” (capa de subsuelo de la corteza terrestre que se encuentra congelada) en Canadá, Alaska, Siberia y Noruega, tiene como consecuencias que por un lado aumente la cantidad de agua que se mueve rumbo a los océanos y, por otro, aumente la emisión de CO_2 y CH_4 . Lo último porque en el subsuelo de estas regiones se encuentran grandes cantidades de materia orgánica acumulada a lo largo de cientos de miles de años y, con el aumento de la temperatura, los microorganismos empiezan a descomponer esta materia orgánica y la transforman en grandes cantidades de CO_2 .^[4] En particular, la fusión de los glaciares de montaña afecta directamente a las comunidades creando problemas de disponibilidad de agua y de su calidad, así como a los sectores agrícola e hidroeléctrico. Sin dejar pasar por alto que se generan más deslizamientos de tierra, avalanchas, desprendimiento de rocas e inundaciones. En este punto es importante resaltar que, aunque se logre hoy día una reducción drástica de las emisiones de gases de efecto invernadero y la temperatura global se estabilice, aún podríamos tener para el año 2100 un aumento del nivel del mar de 60 a 110 cm. Adicionalmente, la expansión de las aguas cálidas en los océanos también afecta la abundancia de la vida marina y cambia la población de peces ya que se reduce el suministro de oxígeno y nutrientes al reducirse la mezcla de capas de agua, repercutiendo en los ecosistemas marinos y tramas alimentarias oceánicas de las que dependen las personas, quienes además son afectadas por olas de calor marinas cada vez más intensas y frecuentes.^[5] Aunado a lo anterior la fusión de los glaciares también deja escapar dióxido de carbono que ha estado atrapado en el hielo por siglos aseverando aún más el problema del calentamiento global.

Este alarmante aumento en la temperatura global del planeta demanda mínimamente limitar el aumento de temperatura del planeta a $1,5^\circ C$ y, si las emisiones continuaran al ritmo actual este límite se alcanzaría en tan solo dos décadas, por lo que, a corto plazo es necesario e inminente reducir gradualmente las emisiones antropogénicas no naturales netas de CO_2 a partir del año 2020 y llegar a cero alrededor del año 2050.^[3]

Las emisiones de CO_2 se relacionan con diferentes sectores económicos como el industrial, el de servicios, hogares, transporte, calefacción urbana, producción de combustibles y, en general, el sector de energía. Sin embargo, los datos de las emisiones netas no están disponibles y en otros casos es difícil su cuantificación.^[6] En el sector industrial las más altas emisiones de CO_2 ocurren en las cementeras, productoras de cal, amoníaco, óxido de etileno, plantas de energía, la industria de metales no ferrosos (producción de aluminio, cobre y zinc) y la industria del vidrio. No obstante, en algunas industrias

como la de amoníaco y óxido de etileno se han acoplado plantas de licuefacción donde el CO_2 es recuperado. Otros sectores emisores de CO_2 son la industria química, la de producción de acero y coque, la industria de alimentos, bebidas y tabaco, la del papel, la madera, el comercio y la agricultura (quema de restos de plantas). La identificación de las fuentes de emisiones de CO_2 y su cuantificación podría ser el primer paso hacia un camino efectivo para mitigar el cambio climático.^[6]

ENTONCES... ¿CÓMO REDUCIR Y/O CONTROLAR EL CONTENIDO DE CO_2 EN LA ATMÓSFERA?

Dados los niveles actuales tan elevados de CO_2 (y otros gases de efecto invernadero) en la atmósfera, el modo radical para resolver el problema sería simplemente ya no generarlo más por métodos artificiales. No obstante, hoy en día con nuestro nivel de vida es prácticamente imposible suspender drásticamente su generación, la cual se suma a las emisiones de CO_2 de fuentes naturales en el planeta.

En el año 2002 en el simposio de la Sociedad Americana de Química (ACS) se propusieron cinco acciones para controlar el nivel de emisiones de CO_2 antropogénicas no naturales (Figura 2):^[7]

1. Elegir fuentes de energía alternativas.
2. Mejorar la eficiencia de la energía generada por fuentes fósiles.
3. Captura de CO_2 .
4. Secuestro de CO_2 .
5. Conversión y utilización de CO_2 .

La elección de *fuentes de energía alternativas* se refiere a optar por formas de energía que produzcan menor cantidad de CO_2 , como gas natural en lugar de carbón. La regla es que a mayor relación H/C menor será la emisión de CO_2 , para lo que las relaciones (en masa) H/C son: gas natural (ca. 3-4), petróleo (ca. 1,8-2,0) y carbón (ca. 0,8-1,2); otras posibilidades son el uso de energía nuclear y otras fuentes de energía renovables como hidroeléctrica, solar, geotérmica y eólica.

Respecto a *mejorar la eficiencia de la energía generada por fuentes fósiles*, los generadores de electricidad basados en fuentes de combustibles fósiles tenían una eficiencia promedio de ca. 35%, es decir, alrededor del 65% de la energía era desperdiciada. Las eficiencias para los automóviles eran incluso más bajas (menores del 20%) por lo que mejoras significativas de eficiencia tanto en tecnologías de generación de energía como en vehículos de transporte han sido logradas y deben seguir mejorando. Esto también se puede aplicar a la industria química donde, por ejemplo, un catalizador más selectivo puede lograr que un proceso de oxidación sea más selectivo de modo que la formación de CO_2 sea minimizada.

La *captura de CO_2* involucra su separación física o química de una mezcla de gases a través de métodos de

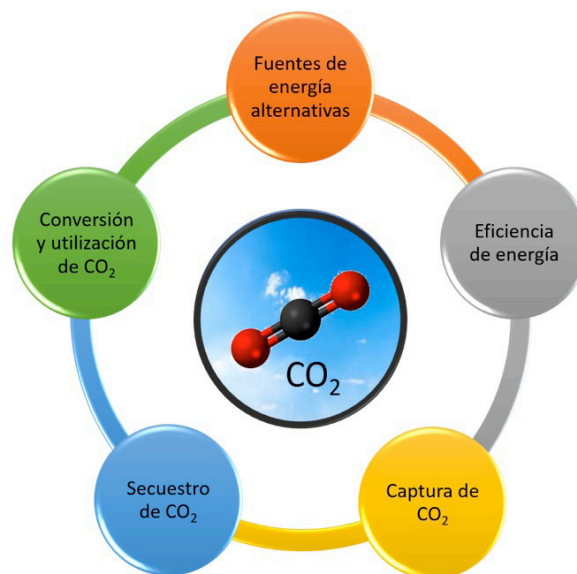


Figura 2. Cinco acciones para controlar el nivel de emisiones de CO_2 antropogénicas no naturales

absorción con un agente como 2-aminoetanol, adsorción física empleando un adsorbente sólido, separación criogénica a bajas temperaturas y separación con el uso de membranas.

Por otra parte, el *secuestro de CO_2* se refiere a su confinamiento a largo plazo en reservorios de gran capacidad. La idea es identificar primero fuentes industriales y energéticas relativamente puras de grandes cantidades de este gas y entonces tomarlas y almacenarlas hasta por cientos de miles de años para su aislamiento de la atmósfera, el almacenamiento puede ser geológico en campos agotados de petróleo y gas, acuíferos salinos profundos, vetas de carbón y en el océano profundo. Sin embargo, a pesar de que esta última alternativa ofrece la máxima capacidad potencial de almacenamiento, este procedimiento aún no es completamente aceptado por los obstáculos legales y su incertidumbre sobre el impacto ambiental y el tiempo de retención del gas que este método pueda tener.

Por último, la *conversión y utilización del CO_2* en productos químicos de alto valor añadido o su almacenamiento en forma de carbonatos minerales, representan procesos más caros que tienen limitada capacidad comparada con los reservorios naturales. Adicionalmente, la mayoría de los procesos industriales requieren una alta pureza de CO_2 , especialmente si el CO_2 se utiliza en el procesamiento de alimentos y bebidas, inclusive para algunos procesos es necesario remover la humedad y trazas de oxígeno. La conversión y utilización del CO_2 representa alrededor del 0,1% de CO_2 liberado a la atmósfera.^[6] Por lo tanto, para que esta opción tenga un efecto importante en la mitigación de este gas de efecto invernadero será necesario incrementar exponencialmente su uso en diferentes procesos.

Para su utilización industrial, a pesar de que el dióxido de carbono se encuentra en la atmósfera y algunos

pozos naturales, el 85% del CO_2 que se usa en la industria proviene de procesos secundarios integrados a la producción de otros productos como por ejemplo la producción de amoníaco y óxido de etileno, fermentación durante la producción de alcohol, producción de hidrógeno, etc. Pero en algunas plantas como las de amoníaco una gran parte del CO_2 recuperado se utiliza para la producción de urea y solo una pequeña cantidad es purificada y licuada.

El dióxido de carbono en la industria se utiliza en varios sectores como el de *procesamiento de alimentos* para la refrigeración y congelado, sacrificio de animales de granja y empaquetado de diversos productos para prevenir pérdida de sabor, descomposición, oxidación y crecimiento de bacterias. Recientemente, el CO_2 se ha empleado como fluido supercrítico para la extracción de la cafeína del café, producción de saborizantes, colorantes naturales y aceites esenciales. Otro uso común es como aditivo en *bebidas carbonatadas y vinos espumosos*.^[6]

En la *industria química* se usa como materia prima para la preparación de salicilato de sodio, el cual es un intermediario en la producción de aspirina, y de carbonatos y/o bicarbonatos de plomo, sodio, potasio y amonio. Además, la industria química está desarrollando procesos químicos para la producción de pigmentos, policarbonatos, uretano y síntesis directa de gasolina. En la *industria de metales* el mayor uso del CO_2 es como gas protector de soldadura para proteger la zona de soldado del efecto del oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. En fundición el CO_2 se emplea en combinación con otros aditivos para moldes de arena para fundición de hierro y otros metales. En la separación de aceite de partículas metálicas generadas durante su maquinado.^[6]

En el área de la *agricultura* el CO_2 es empleado para fumigar los silos de granos, como aditivo de agua de irrigación, aditivo en la atmósfera de invernaderos para estimular el crecimiento de algunas plantas y algas como la Espirulina. En *otros sectores* el CO_2 se utiliza para el procesamiento de gomas y plásticos, el tratamiento de aguas, para enfriamiento en plantas nucleares, como disolvente supercrítico, para reinyectar en pozos con el fin de llevar a cabo una segunda recuperación de petróleo, para recuperar metano y gas natural, para la producción de hielo seco y llenado de cilindros entre otros.

La conversión y utilización de CO_2 destaca por el desarrollo de procesos industriales donde se aprovecha al máximo el CO_2 para la síntesis de compuestos orgánicos de interés tales como ácido salicílico, urea y carbonatos cíclicos, principalmente (Figura 3). Sin embargo, el uso del CO_2 como materia prima involucra un reto sintético debido a que esta molécula es termodinámicamente estable y cinéticamente inerte por lo que es necesaria su activación o su condensación con un sustrato previamente activado y la manera más viable de lograrlo es el uso de un catalizador de metal de transición.^[8]

La coordinación directa del CO_2 al metal de transición logra disminuir la energía de activación requerida para las reacciones donde está involucrado como materia prima y

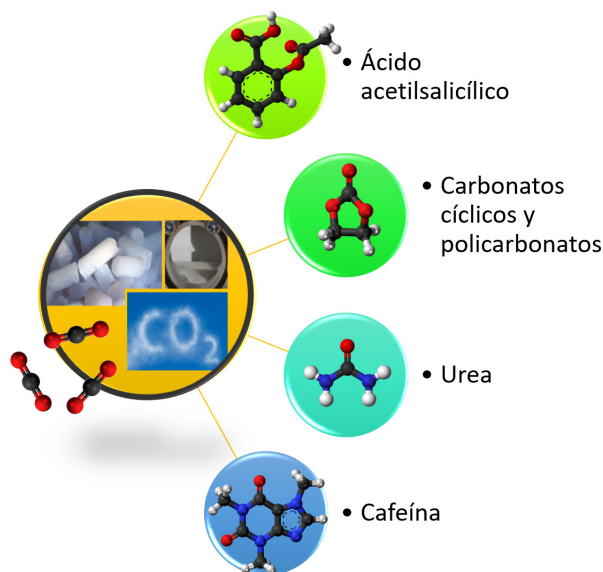


Figura 3. Ejemplos de la conversión y utilización de CO_2

así aumenta la velocidad de reacción haciendo posible la obtención de productos de alto valor añadido que van desde la síntesis de carbonatos orgánicos y metanol, hasta la preparación de policarbonatos biodegradables.^[9]

Es claro que además de las cinco acciones para controlar el nivel de emisiones de CO_2 antropogénicas no naturales es necesario contar con políticas que garanticen la reducción de estas emisiones por parte de los sectores que rigen nuestra forma socioeconómica de vida. Algunas de estas políticas fueron plasmadas en el *protocolo de Kioto* que es un acuerdo internacional de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) para promover el desarrollo sostenible al cumplirse los compromisos de limitación y reducción de emisiones antropogénicas (expresadas en dióxido de carbono equivalente) de los gases de efecto invernadero con miras a reducir el total de estas emisiones en el período de 2008-2012 a un nivel inferior del 5% respecto al nivel registrado en 1990.^[10] El protocolo entró en vigor en 2005 y actualmente tiene una vigencia hasta el 31 de diciembre de 2020. Un segundo acuerdo mundial sobre el cambio climático denominado *acuerdo de París* se alcanzó el 12 de diciembre de 2015 en dicha ciudad y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Este acuerdo busca reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático en un contexto de desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza, de tal manera que se mantenga el incremento medio de la temperatura mundial muy por debajo de 2°C , que se aumente la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y se promueva la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero que no comprometa la producción de alimentos.^[11] Este acuerdo se aplicaría en el presente año 2020, cuando finaliza el protocolo de Kioto.

CONCLUSIONES

El dióxido de carbono es una sustancia benigna que hace posible la vida en el planeta, pero su emisión excesiva a la atmósfera por actividades antropogénicas no naturales, lo hace nocivo ya que incrementa la temperatura global del planeta poniendo en riesgo la vida como la conocemos. Dado el nivel actual tan elevado de CO₂ en la atmósfera, en este momento el modo radical para resolver el problema de emisión sería simplemente ya no generarlo más por métodos artificiales. Sin embargo, nuestro nivel de vida como lo conocemos donde empleamos combustibles fósiles y el desarrollo emergente de nuevas tecnologías verdes para su uso y conversión lo hacen difícil. La gran abundancia del CO₂ lo convierte en una sustancia barata, no tóxica y renovable la cual puede utilizarse para la síntesis de compuestos químicos de alto valor añadido. El uso de tecnologías de recuperación y utilización del CO₂ a escalas importantes puede contribuir, aunque sea modestamente, a la reducción de la emisión e inmisión (calidad del aire) del CO₂ en la atmósfera. No obstante, la proyección de emisiones de CO₂ en el futuro muestra que aún seguirán aumentado modestamente sus niveles y aunque el planeta por sí mismo tiene mecanismos bien establecidos para su atenuación y equilibrio de manera natural, éstos tardarán cientos de miles de años. Por lo tanto, es necesaria la implementación de normativas y estrategias para el control de sus emisiones al mismo tiempo que se mejoren las tecnologías y se empleen energías alternativas económicas. Adicionalmente, es necesario identificar las fuentes de emisión de CO₂ y su cuantificación podría ser el primer paso hacia un camino efectivo para mitigar el cambio climático. Recientemente, también se ha propuesto la *captura directa de CO₂* del aire, que es un proceso caro pero debido al avance tecnológico y la producción de nuevos materiales eficaces para su separación en un futuro puede ser una nueva estrategia rentable. No obstante, una vez capturado aún hay que decidir qué hacer con él.^[12] La empresa *Carbon Engineering* desde 2009 emplea un proceso de captura de CO₂ basado en la generación de carbonato de potasio (K₂CO₃) que selectivamente libera CO₂ que es capturado y empleado para producir combustible sintético.^[13] Por otra parte, *Climeworks* emplea materiales granulados porosos modificados con aminos los cuales capturan el CO₂ y la humedad del ambiente y una vez que se calienta el material cerca de 100 °C el CO₂ capturado es recuperado y combinado con agua para transformarlo en combustible o empleado en la industria de bebidas carbonatadas.^[14] Sin embargo, el gas una vez que es usado volverá a la atmósfera y estaremos con el problema latente. En este contexto, la reforestación global de árboles permanece entre las opciones más efectivas para mitigar el cambio climático,^[15] y empieza a ser una realidad con la iniciativa del Foro Económico Mundial *Trillion Tree* diseñada para apoyar a la restauración del ecosistema en 2021-2030.^[16] Sin embargo, será necesario tomar en cuenta el *tiempo* de crecimiento de un árbol, que puede ser hasta de 25 años, para que compense determinada cantidad de las emisiones, el *espacio* para plantarlos a gran escala, su *permanencia* como materia orgánica ya que una vez que el árbol se degrada completamente el CO₂ regresa a la atmósfera, así como el control de incendios forestales. En este aspecto es muy importante regular que el compromiso de plantación de árboles no sea canjeado por el permiso de seguir contaminando con emisiones indiscriminadas de CO₂, pues con la implementación de programas de compensación de carbono, con lo que se otorgan permisos para emitir el mismo nivel que se compensa, se tiene el riesgo de emitir aún más CO₂ del que se quiere retirar.^[17] En este punto será además necesario considerar hacer estudios de suelo y flora para determinar qué especies de árboles serán los más adecuados por zona geográfica o simplemente reforestar con árboles endémicos, ya que también la elección equivocada del árbol puede desencadenar otros problemas como el consumo excesivo de agua de subsuelo o la pérdida de áreas verdes al introducir árboles territoriales. Entonces ¿es el dióxido de carbono perverso o un benefactor?

ración del ecosistema en 2021-2030.^[16] Sin embargo, será necesario tomar en cuenta el *tiempo* de crecimiento de un árbol, que puede ser hasta de 25 años, para que compense determinada cantidad de las emisiones, el *espacio* para plantarlos a gran escala, su *permanencia* como materia orgánica ya que una vez que el árbol se degrada completamente el CO₂ regresa a la atmósfera, así como el control de incendios forestales. En este aspecto es muy importante regular que el compromiso de plantación de árboles no sea canjeado por el permiso de seguir contaminando con emisiones indiscriminadas de CO₂, pues con la implementación de programas de compensación de carbono, con lo que se otorgan permisos para emitir el mismo nivel que se compensa, se tiene el riesgo de emitir aún más CO₂ del que se quiere retirar.^[17] En este punto será además necesario considerar hacer estudios de suelo y flora para determinar qué especies de árboles serán los más adecuados por zona geográfica o simplemente reforestar con árboles endémicos, ya que también la elección equivocada del árbol puede desencadenar otros problemas como el consumo excesivo de agua de subsuelo o la pérdida de áreas verdes al introducir árboles territoriales. Entonces ¿es el dióxido de carbono perverso o un benefactor?

AGRADECIMIENTOS

A los colegas que amablemente compartieron su opinión sobre el texto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Archer, *The global carbon cycle*, Princeton University Press, **2010**, 1-20.
- [2] M. Aresta, Carbon Dioxide: Utilization Options to Reduce its Accumulation in the Atmosphere. En *Carbon Dioxide as Chemical Feedstock* (ed. M. Aresta), WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, **2010**, 1-13.
- [3] *Cambio Climático: Calentamiento Global de 1,5°C*. Agencia Estatal de Meteorología y Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid, España, **2019**, 1033-1041.
- [4] a) O. A. Anisimov, F. E. Nelson, Permafrost and Global Warming: Strategies of Adaptation. En *Adapting to Climate Change: An International Perspective* (eds. J. B. Smith et al.), Springer-Verlag, New York, **1996**, 440-449; b) R. Margesin, T. Collins, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **2019**, *103*, 2537-2549.
- [5] Comunicado de prensa del IPCC (2019/31/PR), 25 de septiembre de 2019.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/09/srocc_p51-pressrelease_es.pdf
Consultado el 15 de febrero de 2020.
- [6] M. Aresta, *Carbon dioxide Recovery and utilization* (ed. M. Aresta), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, **2003**.

- [7] C. Song, CO₂ Conversion and Utilization: An Overview. En *CO₂ Conversion and Utilization* (eds. C. Song, A. F. Gaffney, K. Fujimoto). American Chemical Society, Estados Unidos, **2002**, 2-30.
- [8] A. Dedieu, C. Bo, F. Ingold, Carbon Dioxide Organometallics Chemistry: Theoretical Developments. En *Metal-ligand interaction: from atoms, to clusters, to surfaces* (eds. D. R. Salahub, N. Russo), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, **1992**, 175-197.
- [9] J. A. Castro-Osma, Utilización de dióxido de carbono como fuente sostenible de carbono para la síntesis de carbonatos cíclicos y policarbonatos, *An. Quím.* **2016**, 112(4), 207-215.
- [10] Naciones Unidas (1998). Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf> Consultado el 15 de febrero de 2020.
- [11] Naciones Unidas (2015). Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf Consultado el 15 de febrero de 2020.
- [12] D. W. Keith, G. Holmes, D. St. Angelo, K. Heidel, A process for capturing CO₂ from the atmosphere, *Joule* **2018**, 2, 1573-1594.
- [13] Carbon Engineering. <http://carbonengineering.com/> Consultado el 24 de febrero de 2020.
- [14] Climeworks. <https://www.climeworks.com/>. Consultado el 24 de febrero de 2020.
- [15] J.-F. Bastin, Y. Finegold, C. Garcia, D. Mollicone, M. Rezende, D. Routh, C. M. Zohner, T. W. Crowther, The global tree restoration potential, *Science* **2019**, 365, 76-79.
- [16] <https://www.it.org/>. Consultado el 24 de febrero de 2020.
- [17] J. Temple (trad. por A. Mulutinovic). <https://www.technologyreview.es/s/11836/por-que-plantar-arboles-no-basta-para-resolver-la-emergencia-climatica> 31 de enero de 2020. MIT Technology Review. Consultado el 24 de febrero de 2020.

