

Química de los contaminantes atmosféricos

Violeta Mugica Álvarez
Editora





SOCIEDAD QUÍMICA
DE MÉXICO, A.C.
"La química nos une"

SOCIEDAD QUÍMICA DE MÉXICO

Presidente Nacional

Dr. Gabriel Eduardo Cuevas González-Bravo

Secretaria

Dra. Annia Galano Jiménez

Tesorero

Dr. Alfonso Ramón García Márquez

Vocal Académica

M. en C. Rosa María Catalá Rodes

Vocal Industrial

I.Q.I. José Antonio Valencia Bravo

Química de los contaminantes atmosféricos

Libro Número 1

Sociedad Química de México, A.C.

Violeta Mugica Álvarez
Editora

Universidad Autónoma
Metropolitana-Azcapotzalco



Temas Contemporáneos de Química

Los derechos exclusivos de la presente edición quedan reservados para todos los países de habla hispana. Queda prohibida su reproducción, parcial o total, por cualquier medio conocido o por conocerse sin el consentimiento por escrito de los legítimos poseedores de derechos.

Sello editorial: Sociedad Química de México, A.C.

(978-607-69750)

Primera edición: diciembre 2023

D. R. © 2023 Violeta Mugica Álvarez

D. R. © 2023 Sociedad Química de México, A.C.

Barranca del Muerto 26, Crédito Constructor, Benito Juárez, 03940 Ciudad de México, CDMX

Imágenes de capítulos:

Un día con aire limpio en la Ciudad de México Fotografía Denis Figueroa Mugica

Hora pico matutina en el la Zona Metropolitana del Valle de México. Fotografía Oscar Hernández Castillo

Fuentes de emisión de dióxido de azufre. Fotografía Alma Angélica Neria Hernández

La eterna primavera del Valle de Cuernavaca. Fotografía Marcos Fernández Cruz

Día de contingencia por ozono en la Ciudad de México. Fotografía Claudia Adriana Martínez Reyes

Emisiones de cenizas del volcán Popocatepetl. Fotografía Brenda Liz Valle Hernández

Quema agrícola. Fuente de hidrocarburos aromáticos policíclicos. Fotografía Violeta Mugica Álvarez

La cerámica vidriada, un factor de riesgo de exposición al plomo. Fotografía Angelica Neria Hernández

Monitoreo de lluvia ácida en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Fotografía Rodolfo Sosa Echeverría

Convertidor catalítico para vehículos a gasolina. Fotografía Miguel Torres Rodríguez

Lavador húmedo para el control de dióxido de azufre. Fotografía Griselda González Cardoso

Al calor de la fogata y la emisión de NOx. Fotografía Violeta Mugica Álvarez

Cristales de dióxido de carbono. Fotografía Miguel Torres Rodríguez

Emisiones por la quema de combustibles fósiles y de biomasa. Fotografía Naxieli Santiago de la Rosa

Diseño editorial e impresión: TINTA NEGRA EDITORES

Formación: Héctor Astorga

Corrección: Dalia Santa Cruz Navarro

Supervisión de producción: Ernesto Iván Mendoza

Avenida del taller 96-28 Col. Tránsito, Alcaldía Cuauhtémoc, C.P. 06820 Ciudad de México
tneditores@gmail.com

ISBN: 978-607-69750-0-8

Impreso y encuadernado

Hecho en México

ÍNDICE

Capítulo 1. Monóxido de carbono	17
<i>José de Jesús Figueroa Lara</i>	
<i>Karina Landeros Mugica</i>	
Capítulo 2. Dióxido de azufre	45
<i>Angélica Neria Hernández</i>	
<i>Araceli Amaya Chávez</i>	
<i>Rodrigo Castañeda Sandoval</i>	
<i>Carlos Aguirre Campuzano</i>	
Capítulo 3. Óxidos de nitrógeno	73
<i>Mario Alfonso Murillo Tovar</i>	
<i>José de Jesús Díaz Torres</i>	
<i>Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña</i>	
Capítulo 4. Ozono	99
<i>Claudia Adriana Martínez Reyes</i>	
Capítulo 5. Partículas atmosféricas	117
<i>Brenda Liz Valle Hernández</i>	
<i>Fernando Millán Vázquez</i>	
<i>Yatziry Montes Gorgua</i>	
Capítulo 6. Hidrocarburos aromáticos policíclicos ..	139
<i>Brenda Liz Valle Hernández</i>	
<i>Yatziry Montes Gorgua</i>	
Capítulo 7. Metales en partículas atmosféricas: el plomo un caso de estudio	161
<i>Juan Carlos Sánchez Meza</i>	
Capítulo 8. Lluvia ácida	187
<i>Rodolfo Sosa Echeverría</i>	
<i>Ana Luisa Alarcón Jiménez</i>	
<i>Pablo Sánchez Álvarez</i>	
<i>Mónica Jaimes Palomera</i>	

Capítulo 9. Control químico de contaminantes de fuentes móviles	203
<i>Miguel Torres Rodríguez</i>	
<i>Mirella Gutiérrez Arzaluz</i>	
Capítulo 10. Control de dióxido de azufre en fuentes fijas	223
<i>Griselda González Cardoso</i>	
<i>Alfonso Espitia Cabrera</i>	
Capítulo 11. Control de óxidos de nitrógeno en fuentes fijas	245
<i>Alfonso Espitia Cabrera</i>	
<i>Griselda González Cardoso</i>	
Capítulo 12. Dióxido de carbono	261
<i>Dalia Santa Cruz Navarro</i>	
<i>Miguel Torres Rodríguez</i>	
Capítulo 13. Contaminantes climáticos distintos al CO ₂	289
<i>Violeta Mugica Álvarez</i>	
<i>Víctor Daniel Domínguez Soria</i>	



CAPÍTULO 12

DIÓXIDO DE CARBONO



Dalia Santa Cruz Navarro

Departamento de Ciencias Básicas.
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

Miguel Torres Rodríguez

Departamento de Ciencias Básicas.
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

12.1 Introducción

El dióxido de carbono (CO_2) es un compuesto que contiene un carbono (C) unido a dos átomos de oxígeno (O) por un doble enlace covalente $\text{C}=\text{O}$. Es una molécula lineal con un ángulo de enlace O-C-O de 180° (Taifan *et al.*, 2016) (Figura 12.1). En el CO_2 , el carbono está presente en su estado de oxidación más alto y, por lo tanto, es química y termodinámicamente estable (Modak *et al.*, 2020).

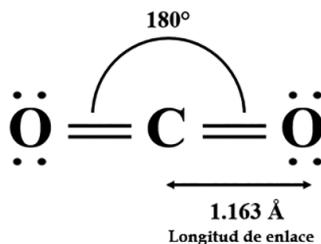


Figura 12.1 Estructura electrónica del dióxido de carbono.

El CO_2 se encuentra naturalmente presente en la atmósfera como parte del ciclo de carbono de la Tierra (la circulación natural de carbono entre la atmósfera, los océanos, el suelo, las plantas y los animales). Se produce dentro de los organismos vivos como subproducto de la respiración celular y durante la combustión de carbono (Bertau *et al.*, 2014). El CO_2 es esencial para la supervivencia de los organismos vivos y también se utiliza como reactivo industrial incluso en forma sólida como hielo seco (Goel y Agarwal, 2014).

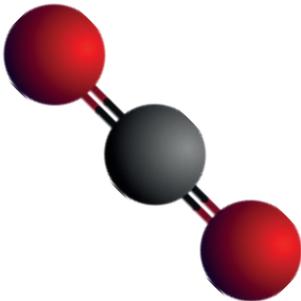
No obstante, la presencia de CO_2 de origen antropogénico se ha incrementado a través de los años a causa de diversas actividades, destacando entre ellas, la quema de combustibles fósiles; lo anterior ha generado un desequilibrio en el ciclo natural del carbono al emitir más CO_2 del que el planeta es capaz de fijar a través de los diferentes procesos naturales, aumentando su concentración en la atmósfera, intensificando el efecto invernadero y en consecuencia, ocasionando un aumento en la temperatura global del planeta, que a su vez, propicia lo que conocemos como cambio climático. Este fenómeno se manifiesta a través de diferentes eventos naturales, como sequías prolongadas, cambio en los patrones de precipitación, eventos meteorológicos más intensos y frecuentes, pérdida de masa glaciar, entre otras. Por estas razones, el CO_2 es considerado como un contaminante climático, siendo el principal gas de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico.

12.2 Propiedades fisicoquímicas

El CO_2 tiene un peso molecular de 44.01 g/mol, es un gas (a temperatura y presión ambiente) incoloro e inodoro con un ligero sabor ácido (Goel y Agarwal, 2014), a presión

atmosférica se sublima directamente de sólido a gas a $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es un gas relativamente inerte que no es ni explosivo ni inflamable y que no favorece la combustión. Tiene una densidad (1.98 g/L a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) superior a la del aire (North, 2015), posee un potencial de ionización de 13.77 Ev (NIOSH, 2019), punto de congelación de $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$ y es soluble en agua (1.45 g/L a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Estas propiedades fisicoquímicas se resumen en la Tabla 12.1.

Tabla 12.1 Propiedades fisicoquímicas del dióxido de carbono.

Molécula	Propiedad	Valor
	Fórmula molecular	CO_2
	Peso molecular	44.01 g/mol
	Longitud de enlaces	1.163 \AA
	Estado de agregación	Gaseoso
	Color	Incoloro
	Olor	Inodoro
	Sabor	Ácido
	Solubilidad en agua	1.45 g/L a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Densidad	1.98 g/L a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Inflamabilidad	Inerte
	Punto de congelación	$-57\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Punto de sublimación	$-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ a presión atmosférica
	Potencial de ionización	13.77 Ev

12.3 Fuentes de emisión

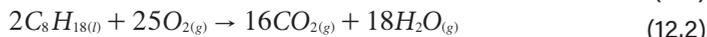
De forma natural, el CO_2 se encuentra en la atmósfera terrestre como resultado de erupciones volcánicas, incendios forestales y la respiración de plantas y animales (North, 2015). Por otro lado, actividades humanas como la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gasolina, gas natural, combustible diésel, entre otros) (Goel y Agarwal, 2014), el cultivo del suelo, procesos industriales, entre otras actividades, también producen CO_2 (Ahluwalia, 2017).

En la atmósfera, el CO_2 se solubiliza de acuerdo con la Ley de Henry en el agua que forma las gotas de lluvia. La hidratación del CO_2 disuelto da lugar al ácido carbónico (H_2CO_3) (Bogan *et al.*, 2009), por esta razón la lluvia es ligeramente ácida presentando un pH de alrededor de 5.6 (US EPA, 2023). Por otro lado, el CO_2 se recicla en el ecosistema a través de la respiración, la fotosíntesis y la combustión (Goel y Agarwal, 2014). Los principales consumidores de CO_2 son las plantas que lo utilizan para la fotosíntesis. Además, el CO_2 de la atmósfera se disuelve en los océanos y forma carbonatos. De

esta forma, tanto las plantas como los océanos mantienen un equilibrio de CO₂ en la atmósfera (Ahluwalia, 2017). Sin embargo, la concentración de CO₂ en la atmósfera se ha incrementado desde el inicio de la revolución industrial y se ha acelerado en las últimas décadas debido a las actividades antropogénicas, principalmente, por la quema de combustibles fósiles, originando un desequilibrio en el ciclo natural del carbono.

Las emisiones de CO₂ antropogénico resultan de la reacción de combustión del carbono. La combustión se utiliza actualmente para producir energía, en centrales térmicas y también en procesos industriales y para alimentar motores de combustión interna utilizados en sistemas de transporte como automóviles, camiones, aviones, barcos y trenes (Gomes, 2013).

Al aproximar la estructura del carbón al carbono sólido y de los combustibles líquidos de transporte (gasolina, diésel, combustible de aviación, etc.) al octanaje, la combustión del carbón, del combustible de transporte (gasolina) y del gas natural se representa mediante las ecuaciones (12.1), (12.2) y (12.3) respectivamente (North, 2015).



12.3.1 Fuentes de emisión en México y el mundo

De acuerdo a la base de datos de emisiones para la investigación atmosférica global (EDGAR, por sus siglas en inglés), en 2021 las emisiones globales de CO₂ fueron de 37.9 Gt (Gigatoneladas, 1x10⁹ toneladas) de las cuales, el sector energético (plantas de generación de energía públicas y auto productoras) contribuyó con el 37.66% del total de emisiones con 14.26 Gt de CO₂, seguido del sector transporte (transporte por carretera, ferroviario, aviación nacional, transporte marítimo nacional, transporte por vías navegables interiores para cada país, transporte marítimo y aviación internacionales) con el 20.19% (7.64 Gt), otro tipo de combustión industrial (combustión para la fabricación industrial y la producción de combustible) con el 21.44% (8.12 Gt). Otros sectores como procesos industriales relacionados con minerales no metálicos, metales no ferrosos, disolventes, otros usos de productos químicos, suelos agrícolas (fertilización con urea y aplicación de cal), residuos con el 11.69% (4.42 Gt) y las edificaciones (combustión estacionaria no industrial a pequeña escala) con el 9.01% (3.41 Gt) (Crippa *et al.*, 2022).

En 2021, México solo contribuyó con el 1.11% del total de emisiones globales de CO₂ emitiendo cerca de 0.42 Gt, siendo el sector transporte el mayor contribuyente con el 27.85% (0.12 Gt), seguido del sector energético con 27.16% (0.11 Gt), otro tipo de combustión con 21.94% (0.09 Gt), otros sectores con el 17.33% (0.07 Gt) y las edificaciones con el 5.73% (0.02 Gt) (Crippa *et al.*, 2022).

Las emisiones de CO₂ descritas anteriormente se muestran gráficamente en la Figura 12.2.

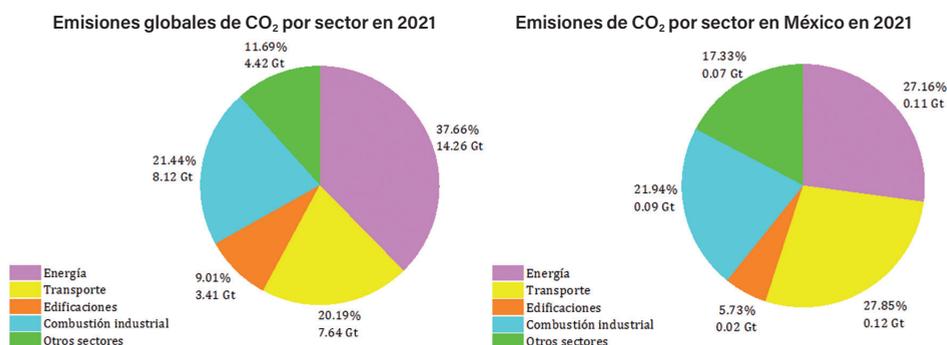


Figura 12.2 Emisiones de CO₂ por sector en el año 2021.

12.4 Comportamiento químico del CO₂ en la atmósfera

Una vez emitido, el CO₂ circula entre la atmósfera, los océanos y la biósfera terrestre y su eliminación de la atmósfera implica una serie de procesos con diferentes escalas de tiempo. Alrededor del 50% del CO₂ se eliminará de la atmósfera en 30 años, y un 30% más se eliminará en unos pocos siglos. El 20% restante puede permanecer en la atmósfera durante muchos miles de años (IPCC, 2007). Por lo tanto, el CO₂ se acumula en la atmósfera en función de lo que llamamos "tiempo de residencia". El tiempo de residencia es el tiempo requerido para que el CO₂ emitido se elimine de la atmósfera a través de procesos naturales en el ciclo del carbono de la Tierra. La duración de este tiempo puede variar ya que parte del CO₂ se elimina en menos de 5 años a través de procesos de ciclo rápido, mientras que otros procesos, como la absorción a través de la vegetación terrestre, los suelos y el ciclo hacia el océano profundo, pueden llevar de cientos a miles de años (Ritchie y Roser, 2020).

12.4.1 El CO₂ y el efecto invernadero

El efecto invernadero es un proceso natural que permite mantener la temperatura media de nuestro planeta en 15 °C sobre cero. Sin él, la vida en la Tierra sería imposible ya que la temperatura sería de -18 °C en varias regiones del planeta (Mikhaylov *et al.*, 2020). Este efecto invernadero natural que ha tenido el planeta durante millones de años, se debe principalmente al vapor de agua (H₂O), sin embargo, en las últimas décadas este efecto de calentamiento se ha visto incrementado por la presencia de los gases denominados invernadero, siendo el más importante el CO₂.

Las moléculas de CO₂ que tienden a acumularse en la atmósfera terrestre crean una capa que atrapa el calor que se reemite desde la superficie terrestre debido a la radiación infrarroja (Gomes, 2013). Cuando la luz del sol, que consiste en rayos UV, luz visible y radiación infrarroja, llega a la atmósfera, los rayos UV son absorbidos por la capa de ozono, por lo que no llegan a la superficie de la Tierra. Sin embargo, la luz visible y

los rayos infrarrojos atraviesan la capa de CO_2 y llegan a la Tierra. El resultado es que la Tierra se calienta por las radiaciones infrarrojas. A medida que la Tierra se calienta, comienza a emitir calor (rayos infrarrojos) a la atmósfera. Los rayos infrarrojos emitidos son absorbidos por las moléculas de CO_2 . De esta forma, el CO_2 presente no permite que las radiaciones infrarrojas reflejadas por la superficie terrestre salgan de la atmósfera. Estos rayos infrarrojos atrapados calientan la atmósfera terrestre. El calentamiento de la Tierra debido al atrapamiento de las radiaciones infrarrojas (reflejadas desde la superficie terrestre) por la capa de CO_2 en la atmósfera se denomina "efecto invernadero". El aumento de la temperatura provocado por el efecto invernadero depende principalmente de la cantidad de CO_2 presente en la atmósfera (Ahluwalia, 2017).

El CO_2 no es el único gas responsable de crear este efecto invernadero, ya que las moléculas de otros gases pueden absorber la radiación solar infrarroja con mayor intensidad ya que poseen mayor potencial de calentamiento (Gomes, 2013).

De forma general, los gases atmosféricos que tienen la capacidad de absorber y devolver la radiación infrarroja (IR) en el sistema Tierra-atmósfera son conocidos como gases de efecto invernadero (GEI). En este proceso, los gases atmosféricos absorben y devuelven la radiación IR en la atmósfera inferior, emitiendo y absorbiendo energía térmica de manera efectiva, de esta forma, mantienen el balance de calor de la atmósfera terrestre (Bhattacharyya *et al.*, 2020).

El aire seco en la atmósfera de la Tierra tiene aproximadamente 78.08% de nitrógeno (N_2), 20.95% de oxígeno (O_2), 0.93% de argón (Ar) y una mezcla de gases traza representa aproximadamente el 0.04%, incluidos los gases de efecto invernadero (GEI) dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y ozono (O_3). Aunque estos gases de efecto invernadero representan solo un pequeño porcentaje de nuestra atmósfera, juegan un papel importante en la captura del calor radiante de la Tierra y evitan que se escape al espacio, calentando así nuestro planeta y contribuyendo al efecto invernadero de la Tierra (Buis, 2019).

Aunque varios de los principales GEI se producen de forma natural, el aumento de sus concentraciones atmosféricas en los últimos 250 años se debe en gran medida a las actividades humanas. Otros gases de efecto invernadero como gases fluorados son enteramente el resultado de actividades humanas (IPCC, 2007).

Para entender el efecto invernadero, es importante tener en cuenta que las posiciones relativas de los átomos en una molécula no son exactamente fijas, sino que fluctúan continuamente como consecuencia de una multitud de tipos de vibraciones y rotaciones diferentes alrededor de los enlaces en la molécula (Skoog *et al.*, 2017). La radiación infrarroja hace que los enlaces químicos en las moléculas vibren de diferentes maneras. Durante un proceso de absorción, la molécula absorbe solo aquellas frecuencias de radiación IR que coinciden con la frecuencia vibratoria natural de los enlaces y, por lo tanto, aumenta la amplitud de los modos vibratorios de las moléculas (Khan *et al.*, 2018).

La propiedad física fundamental de un GEI es que debe absorber la radiación infrarroja a través de uno o más de sus modos de vibración en el rango infrarrojo de 6 a 25 μm . Un modo de vibración molecular solo es activo en el infrarrojo si el movimiento de los átomos genera un momento dipolar (Tuckett, 2019).

Si vemos la química de los GEI, el punto clave es que deben tener momentos dipolares. Esta es la propiedad que los hace capaces de absorber e irradiar en el rango de radiación IR. En una molécula, cuando los electrones de valencia no se comparten por igual en un enlace entre los dos átomos, se desarrolla una ligera carga positiva sobre un átomo y una carga negativa sobre el otro átomo. Esa diferencia de carga de los diferentes átomos en una molécula genera el momento dipolar (Bhattacharyya *et al.*, 2020).

Por lo tanto, la absorción y la fuerza de absorción de radiación IR dependen del momento dipolar de las moléculas. Las moléculas simétricas no absorben la radiación IR, debido al momento dipolar cero (Khan *et al.*, 2018). El N₂ y el O₂, al ser moléculas diatómicas homonucleares que constituyen más del 99% de la atmósfera terrestre, no absorben la radiación infrarroja porque su único modo vibratorio no genera un momento dipolar, por lo que no intervienen en el efecto invernadero. Únicamente los gases traza en la atmósfera como CO₂, CH₄, N₂O, O₃ y gases fluorados son los que contribuyen al efecto invernadero (Tuckett, 2019).

Cabe mencionar que el CO₂ tiene enlaces químicos simétricos, entonces, no tiene un momento dipolar como tal. Sin embargo, debido al estiramiento asimétrico y la vibración de sus enlaces, se genera un momento dipolar instantáneo que lo hace capaz de absorber y devolver la radiación IR (Bhattacharyya *et al.*, 2020). Un ejemplo es que el CO₂ absorbe la radiación IR a través de su modo vibracional de flexión ν_2 a 667 cm⁻¹ (Tuckett, 2019).

Los GEI como CO₂, O₃ y H₂O (gas de efecto invernadero natural) absorben la radiación IR en el rango de 590 a 830 cm⁻¹, 1,040 cm⁻¹ y $\lambda > 1,250$ cm⁻¹, respectivamente y un gas de efecto invernadero secundario efectivo es aquel que absorbe fuertemente la radiación infrarroja fuera de estos rangos de longitudes de onda (Tuckett, 2019). Todos los gases atmosféricos tienen un patrón único de absorción de energía, absorben algunas longitudes de onda de energía pero son transparentes para otras (Lindsey, 2009).

El régimen térmico atmosférico está controlado principalmente por la composición de la atmósfera y los procesos radiativos asociados (MacDonald, 1988). El clima medio global de la Tierra, está determinado por la energía entrante del sol y por las propiedades de la Tierra y su atmósfera, es decir, la reflexión, absorción y emisión de energía dentro de la atmósfera y en la superficie. Con base en lo anterior, se ha originado un cambio climático debido a cambios en varios aspectos de la atmósfera y la superficie que alteran el balance energético global de la Tierra (IPCC, 2007).

Bajo este contexto, el forzamiento radiativo es una medida de la influencia que tiene un factor en la alteración del equilibrio de energía entrante y saliente en el sistema Tierra-atmósfera y es un índice de la importancia del factor como mecanismo potencial del cambio climático. El factor dominante en el forzamiento radiativo del clima en la era industrial es la creciente concentración de varios GEI en la atmósfera (IPCC, 2007).

La contribución de un determinado GEI distinto del CO₂ al forzamiento radiativo depende de su capacidad para absorber la radiación infrarroja emitida por la superficie y la atmósfera de la Tierra. Esta capacidad está determinada por las propiedades espectroscópicas fundamentales de la molécula; para ser realmente eficaz, la molécula debe absorber longitudes de onda en las que la atmósfera no está ya absorbiendo fuertemente.

La contribución también depende del cambio en la concentración atmosférica del gas; este cambio está determinado por el volumen de sus emisiones y por su tiempo de vida atmosférico. La vida útil de los gases de efecto invernadero distintos del CO₂ varía desde menos de un año hasta miles de años (Shine y Sturges, 2007). Cuanto más larga sea la vida útil, mayor será la contribución de un GEI al calentamiento global (Tuckett, 2019). Los GEI de larga vida, como el CO₂, CH₄ y N₂O, son químicamente estables y persisten en la atmósfera en escalas de tiempo de una década a siglos o más, por lo que su emisión tiene una influencia a largo plazo sobre el clima (IPCC, 2007).

El nivel de impacto de los GEI se compara considerando su respectivo potencial de calentamiento global. El Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés) es una métrica útil para comparar el impacto climático potencial de las emisiones de diferentes GEI. Los potenciales de calentamiento global comparan el forzamiento radiativo integrado durante un período específico (por ejemplo, 100 años en el caso del Protocolo de Kyoto) a partir de una emisión de pulso de masa unitaria en comparación con un valor de 1 para CO₂, este indicador se conoce como dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) (IPCC, 2007). De esta forma, las emisiones de los diferentes GEI son reportadas como cantidades de CO₂eq.

12.4.1.1 Emisiones de gases de efecto invernadero en México y el mundo

En 2019 las emisiones antropogénicas globales de GEI fueron de 59±6.6 GtCO₂eq (gigatoneladas de CO₂ equivalente), de las cuales, 38±3 GtCO₂eq (≈64%) fueron atribuidas al CO₂ de combustibles fósiles y actividades industriales, 6.6±4.6 GtCO₂eq (≈11%) al CO₂ del uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura, 11±3.2 GtCO₂eq (≈18%) de metano, 2.7±1.6 GtCO₂eq (≈5%) de óxido nitroso y 1.4±0.41 GtCO₂eq (≈2%) de gases fluorados (HFC, PFC, NF₃, SF₆) (Figura 12.3a) (IPCC, 2022). El sector energético (consumo energético de combustibles fósiles incluido transporte y emisiones fugitivas) generó el 48.03% (28.10 GtCO₂eq) del total de emisiones de GEI, el sector industrial (químicos, cemento, metales, entre otros) generó el 19.83% (11.60 GtCO₂eq), las edificaciones el 5.64% (3.30 GtCO₂eq), los residuos el 4.10% (2.40 GtCO₂eq) y el sector agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra ASOUT emitieron el 22.39% (13.10 GtCO₂eq) (Figura 12.4a) (Boehm *et al.*, 2022).

Por su parte, las emisiones de GEI en México ascendieron a 0.7366 GtCO₂eq en 2019. El principal gas de efecto invernadero fue el CO₂ con el 67.0% (0.49 GtCO₂eq) del total de emisiones, seguido por el metano con el 24.0% (0.18 GtCO₂eq), el óxido nitroso con el 6.0% (0.04 GtCO₂eq) y los gases fluorados (HFC, PFC, NF₃, SF₆) con el 3.0% (0.02 GtCO₂eq) (Figura 12.3b). El sector energético (consumo energético de combustibles fósiles y emisiones fugitivas) generó el 63.52% de las emisiones totales de GEI (0.47 GtCO₂eq), el sector industrial que considera las emisiones generadas en la industria de los minerales, la industria química, la industria de los metales, el uso no energético de combustibles y disolventes, la industria electrónica, la fabricación de equipos eléctricos y la industria de la pulpa y el papel, aportó el 10.00% (0.07 GtCO₂eq), los residuos contribuyeron con el 7.37% (0.05 GtCO₂eq) y el sector agricultura, silvicultura y otros

usos de la tierra ASOUT emitieron el 19.11% (0.14 GtCO₂eq) (Figura 12.4b) (SEMARNAT e INECC, 2022).

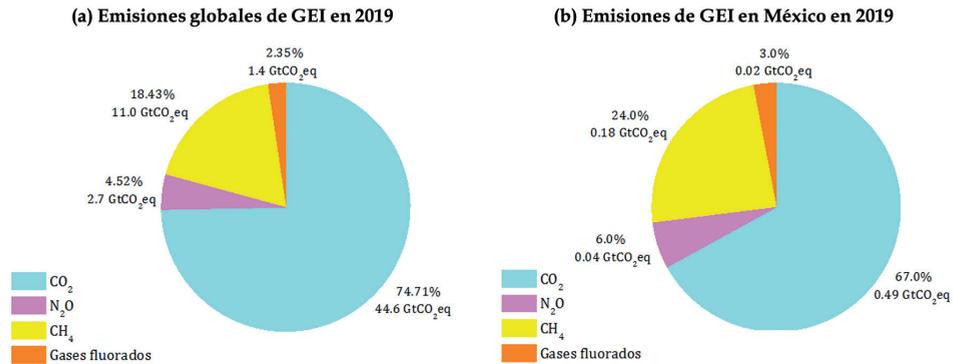


Figura 12.3 Emisiones de GEI en el año 2019.

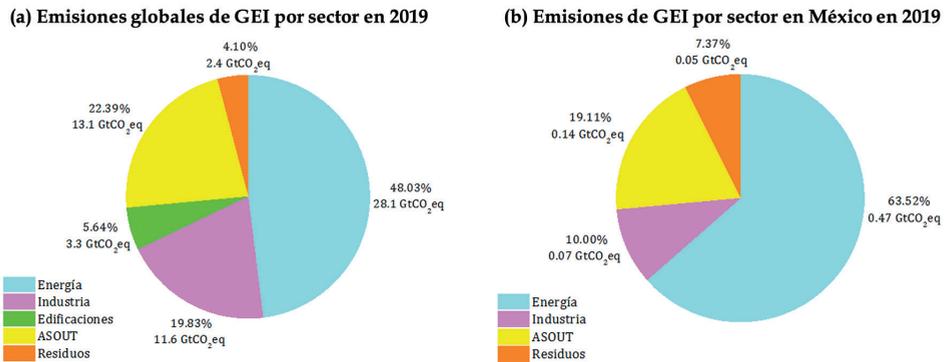


Figura 12.4 Emisiones de GEI por sector en el año 2019.

12.4.2 El CO₂ y el calentamiento global

Como se expuso anteriormente, el clima medio global de la Tierra está determinado por la energía entrante del sol y por las propiedades de la Tierra y su atmósfera, si se generan cambios en estos aspectos, se altera el balance energético global de la Tierra y por ende se altera el sistema climático. Por lo tanto, al aumentar la concentración de GEI en la atmósfera, en especial de CO₂, se retiene más radiación IR intensificando así el efecto invernadero, lo que ocasiona un aumento en la temperatura global del planeta y de esta forma se altera el balance energético global y en consecuencia, se influye en el sistema climático.

En 2018 el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) estimó que las actividades humanas han causado un aumento de aproximadamente 1.0 °C de calentamiento global arriba de los niveles preindustriales, con un rango probable de 0.8 °C a 1.2 °C (IPCC, 2018).

De igual forma, un análisis de temperatura en curso dirigido por científicos del Instituto Goddard de Estudios Espaciales (GISS, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) indica que la temperatura global promedio en la Tierra ha aumentado al menos 1.1 °C desde 1880, señalando además, que la mayor parte del calentamiento se ha producido desde 1975, a un ritmo de aproximadamente 0.15 a 0.20 °C por década (NASA, 2023).

Por su parte, en 2019, la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) evaluó el impacto del uso de combustibles fósiles en el aumento de la temperatura global, y descubrió que el CO₂ emitido por la combustión del carbón es responsable de más de 0.3 °C de 1 °C del aumento de la temperatura (IEA, 2019).

En la Figura 12.5 se puede observar una gráfica autoría de la IEA que muestra el incremento de las emisiones de CO₂ relacionadas con la combustión para la generación de energía, así como, de emisiones provenientes de diferentes procesos industriales, en ella se observa como a partir de la década de 1960 las emisiones de CO₂ han aumentado aceleradamente hasta alcanzar un total de 36.3 Gt en el año 2021 (IEA, 2022).

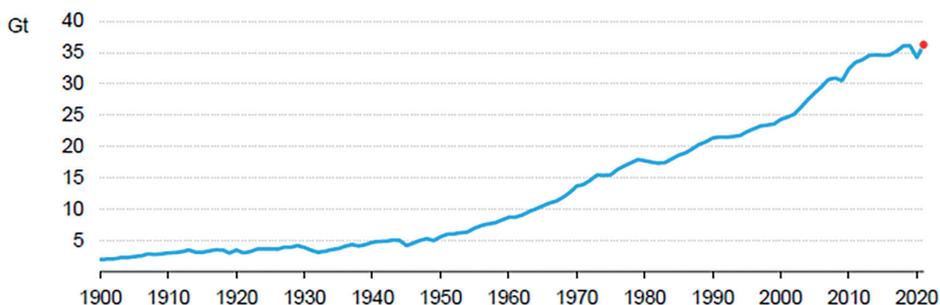


Figura 12.5 Emisiones totales de CO₂ procedentes de la combustión de energía y de procesos industriales y su variación anual, 1900-2021 (adaptado de IEA, 2022).

Por otro lado, en la Figura 12.6 se presenta una gráfica elaborada a partir de datos reportados por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), en ella se muestra las anomalías en las temperaturas globales terrestres y oceánicas desde el año 1850 a 2022. En esta gráfica se puede observar que la temperatura global terrestre ha aumentado más que la temperatura oceánica, sin embargo, en conjunto, la temperatura terrestre y oceánica ha incrementado en promedio 1 °C como ha sido mencionado anteriormente (NOAA, 2023a).

En la Figura 12.6 es claramente visible el aumento de la temperatura global de forma acelerada a partir de la década de 1970, lo cual sugiere una influencia directa del aumento de la concentración de GEI en especial de CO₂, que como se mostró en la Figura 12.5, sus emisiones se han incrementado considerablemente a partir de la década de 1960.

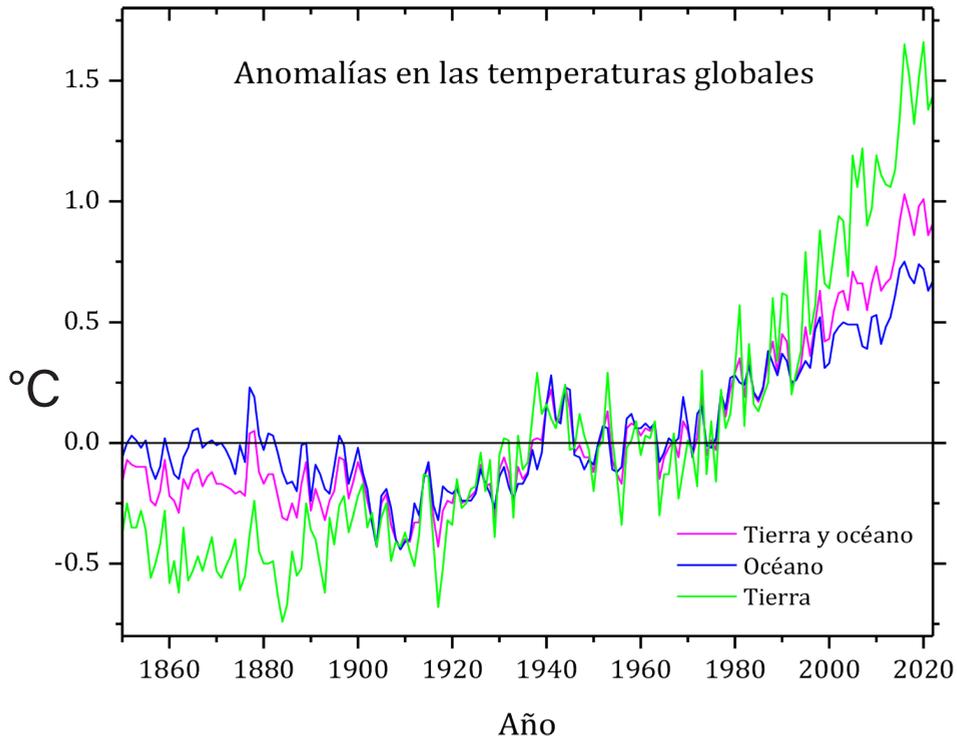


Figura 12.6 Anomalías en las temperaturas globales en el periodo de 1850-2022 (Adaptado de NOAA, 2023a).

Con base en los datos reportados por la NOAA, el año 2022 fue el sexto año más cálido desde que comenzaron los registros mundiales en 1880, con 0.86 °C por encima del promedio del siglo XX de 13.9 °C. Los 10 años más cálidos en el registro de 143 años han ocurrido desde 2010 y los últimos nueve años (2014-2022) se ubican como los nueve años más cálidos registrados (NOAA, 2023b).

En la Tabla 12.2 se enumera el rango y la anomalía de la temperatura promedio anual global combinada terrestre y oceánica para cada uno de los 10 años más cálidos registrados.

Tabla 12.2 Diez años más cálidos registrados en el periodo 1880-2022 (NOAA, 2023b).

Rango 1=Más cálido Período de registro: 1880-2022	Año	Anomalía °C
1	2016	0.99
2	2020	0.98
3	2019	0.94
4	2015	0.93
5	2017	0.91
6	2022	0.86
7	2021	0.84
8	2018	0.82
9	2014	0.74
10	2010	0.72

12.4.3 El CO₂ y el cambio climático

Un aumento en la temperatura promedio de la atmósfera terrestre debido al efecto invernadero tiene efectos de gran alcance en el clima y, en consecuencia, en los sistemas clave de soporte vital del planeta (Ahluwalia, 2017), ya que la estabilidad del clima es la principal condición para la existencia de vida en la Tierra (Mikhaylov *et al.*, 2020).

Los riesgos del cambio climático dependen de la magnitud y la tasa de calentamiento, ubicación geográfica, niveles de desarrollo y vulnerabilidad, y sobre la implementación de opciones de adaptación y mitigación. Entre los riesgos se encuentra el aumento del nivel del mar, acidificación de los océanos, impactos sobre la biodiversidad y los ecosistemas, incluida la pérdida y extinción de especies, riesgos relacionados con los medios de vida, la seguridad alimentaria, el suministro de agua y la seguridad humana, entre otros (IPCC, 2018).

Entre las consecuencias del calentamiento global y cambio climático, se tiene registro del derretimiento de las capas de hielo y glaciares, estimando una pérdida de 25 metros de agua líquida en el periodo de 1970-2020, el equivalente a cortar 27.5 metros de hielo de la parte superior de cada glaciar (Lindsey, 2020a); también, se destaca el aumento acelerado del nivel del mar, que en 2021 el aumento medio global reportado fue de 97 milímetros por encima de los niveles de 1993 (Lindsey, 2022b); se ha incrementado

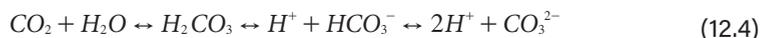
el contenido de calor del océano en aproximadamente 0.64-0.80 vatios por metro cuadrado de 1993 a 2021, lo cual contribuye al aumento del nivel del mar, blanqueamiento de los corales, y el derretimiento de los glaciares y las capas de hielo (Lindsey, 2020b); del mismo modo, se han generado eventos extremos más frecuentes y más intensos, cambios en los patrones de precipitación, así como cambios en las zonas climáticas, incluida la expansión de zonas áridas y contracción de zonas polares (Lindsey, 2022a).

12.5 Daños al medio ambiente

Además de los efectos del cambio climático expuestos anteriormente, el aumento de la concentración de CO_2 en la atmósfera ha generado acidificación de los océanos. Los océanos absorben de forma natural el CO_2 de la atmósfera como parte del ciclo global del carbono (Oppenheimer, 2016). La cantidad total de carbono en el océano es 50 veces mayor que la cantidad en la atmósfera. La disolución en los océanos proporciona un gran sumidero de CO_2 antropogénico, debido en parte a su alta solubilidad, pero sobre todo a su disociación en iones e interacciones con los constituyentes del agua de mar (IPCC, 2001).

La absorción de CO_2 antropogénico por el océano se rige principalmente por la circulación oceánica y la química del carbonato (IPCC, 2001). El CO_2 que se disuelve en el agua de mar se encuentra en tres formas principales. La suma de estas formas constituye carbono inorgánico disuelto (DIC). Las tres formas son: (1) CO_2 disuelto (no iónico, alrededor del 1% del total) que se puede intercambiar con la atmósfera hasta que la presión parcial en el agua superficial y el aire sean iguales, (2) ion bicarbonato (HCO_3^- , alrededor del 91%); y (3) ion carbonato (CO_3^{2-} , alrededor del 8%) (IPCC, 2001).

El CO_2 cuando se disuelve, reacciona con el agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3), que se disocia en un ion de hidrógeno (H^+) y un ion bicarbonato (HCO_3^-), y parte del H^+ luego reacciona con el ion carbonato (CO_3^{2-}) para formar un segundo HCO_3^- (Ecuación 12.4). Por tanto, el resultado neto de añadir CO_2 al agua de mar es un aumento de H^+ y HCO_3^- , pero una reducción de CO_3^{2-} . La disminución del ion CO_3^{2-} reduce la capacidad amortiguadora general a medida que aumenta el CO_2 , con el resultado de que proporcionalmente más iones H^+ permanecen en la solución y aumentan la acidez (IPCC, 2007).



A medida que aumenta la acidez de los océanos, los iones carbonato disponibles (CO_3^{2-}) se unen con el exceso de hidrógeno, lo que da como resultado menos iones de carbonato disponibles para que los organismos calcificadores construyan y mantengan sus caparazones, esqueletos y otras estructuras de carbonato de calcio. Si el pH baja demasiado, las conchas y los esqueletos pueden incluso comenzar a disolverse (NOAA, 2020).

Si no se ralentiza y finalmente se estabiliza o revierte, el aumento gradual de la acidez reducirá las concentraciones de calcio lo suficiente como para amenazar a las

poblaciones de muchos invertebrados oceánicos, que van desde fuentes de alimento humano como langostas y almejas hasta el zooplancton que constituyen la base del ecosistema oceánico. Los arrecifes de coral, que albergan gran parte de la biodiversidad de los océanos y un hábitat crítico para las especies de pesca comercial, están en riesgo tanto por la acidificación como por el calentamiento global, así como por varias amenazas no climáticas. A menos que se reduzcan las emisiones de CO₂, se estima que más de la mitad de las especies de peces se vean perjudicadas solo por la acidificación de los océanos durante este siglo (Oppenheimer, 2016).

12.6 Daños a la salud

El CO₂ puede causar daños a la salud cuando se tiene exposición por inhalación a altas concentraciones afectando el sistema respiratorio y sistema cardiovascular. Un aumento en la concentración de CO₂ en la sangre conduce a la toxicidad al disminuir el pH (acidosis respiratoria). Los síntomas de la toxicidad del CO₂ incluyen presión arterial alta, piel enrojecida, dolor de cabeza y espasmos musculares. La exposición a niveles más altos puede causar pánico, latidos cardíacos irregulares, alucinaciones, vómitos y potencialmente pérdida del conocimiento o incluso la muerte (Goel y Agarwal, 2014). Si una persona respira grandes cantidades de este químico, la persona expuesta debe conducirse al aire libre de inmediato, pero si la respiración se ha detenido, se debe administrar oxígeno al 100% y conseguir atención médica lo antes posible (NIOSH, 2018).

Con base en lo anterior, es importante que en espacios interiores se respeten los límites de exposición de CO₂ recomendada. De acuerdo al Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (NIOSH, 2019), en términos laborales, no se deben rebasar las 5,000 ppm (9,000 mg/m³) como promedio durante una jornada de diez horas y 30,000 ppm (54,000 mg/m³), que nunca deben excederse durante ningún periodo de trabajo mayor de 15 minutos.

El CO₂ también puede causar daño por contacto con la piel y/o los ojos (CO₂ líquido, hielo seco) (NIOSH, 2019), en este caso, el CO₂ puede causar congelamiento, por lo tanto, se debe buscar atención médica de inmediato (NIOSH, 2018).

No obstante, debe considerarse que el CO₂ es producido por el metabolismo del cuerpo y siempre está presente en una concentración de alrededor del 6%. Un ser humano adulto promedio produce más de 500 g de CO₂ al día en condiciones de reposo y produce mucho más cuando está activo. La exposición al 7%-10% produce pérdida del conocimiento en pocos minutos. Concentraciones >10% pueden causar convulsiones, coma y muerte (NIH, 2015).

12.7 Monitoreo y detección del CO₂

Debido al constante aumento de las emisiones de CO₂ antropogénico y a su influencia en la acidificación de los océanos, en el incremento de la temperatura global del pla-

neta y por lo tanto, en el cambio climático, se lleva a cabo un monitoreo constante de las emisiones de este GEI.

El CO₂ al ser un GEI de larga vida, se mezcla bien en la atmósfera mucho más rápido de lo que se elimina y su concentración global se pueden estimar con precisión a partir de datos en algunos lugares (IPCC, 2007).

El Laboratorio de Monitoreo Global de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA/GML, por sus siglas en inglés) opera observatorios atmosféricos de referencia desde los cuales se realizan numerosas mediciones atmosféricas y solares in situ y remotas. Estos observatorios se establecieron para proporcionar muestras del aire más remoto del planeta para monitorear la verdadera "atmósfera de fondo". GML mide los gases de efecto invernadero en cuatro de los Observatorios: Barrow, Alaska; Mauna Loa, Hawaii; Samoa Americana; y el Polo Sur, la Antártida. GML comenzó a realizar mediciones de CO₂ en los observatorios en 1973 y agregó mediciones de CH₄ y CO en la década de 1980. Las mediciones continuas in situ de estos gases brindan gran detalle en sus tendencias a largo plazo, variaciones estacionales y a corto plazo y ciclos diarios. Además, el GML comenzó a realizar mediciones desde torres altas en la década de 1990 para extender el monitoreo de CO₂. Las torres de televisión, radio y telefonía celular existentes se utilizan como plataformas de muestreo in situ (NOAA, 2023c). También, se incluye muestras de aire recolectadas por voluntarios en más de 50 sitios alrededor del mundo (NOAA, 2023d).

Por su parte, América Latina, cuenta con el Sistema de Monitoreo Satelital de Gases de Efecto Invernadero. El Sistema permite observar las tendencias en la concentración de los GEI de origen antropogénico, tanto a nivel de América Latina, de los países que la integran, así como de sus principales ciudades y otras subregiones de interés. El Sistema monitorea las emisiones de CO₂, con base en un modelo de dispersión atmosférica regional (CEPAL, 2023).

Otro sistema de monitoreo a nivel global pertenece a la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés), la cual cuenta con dos observatorios de carbono en órbita, OCO-2 y OCO-3. El OCO-2 fue la primera misión de la NASA dedicada al estudio del CO₂ desde el espacio y el OCO-3 fue fabricado como repuesto para OCO-2 (Payne, 2022).

El OCO-2 recolecta observaciones científicas en tres diferentes modos: Nadir, Glint, y Target. El modo Nadir, proporciona la resolución espacial más alta en la superficie y se espera que proporcione mediciones en regiones que están parcialmente nubladas o tienen una topografía significativa. En el modo Glint, la nave espacial apunta el instrumento hacia el punto brillante del "destello", donde la radiación solar se refleja desde la superficie. En el modo Target, el observatorio fija sus observaciones en una ubicación específica en la superficie y retiene esa vista mientras vuela por encima. Por su parte, el OCO-3 recolecta observaciones científicas en los modos Nadir, Glint, Target, y Snapshot Area Map (SAM). En ambos observatorios el monitoreo se realiza utilizando espectroscopia de infrarrojo mediante la cual se identifican las bandas de absorción del CO₂ (Payne, 2022).

12.8 Niveles de concentración de CO₂ globales

Se estima que las emisiones netas acumuladas históricas de CO₂ desde 1850 hasta 2019 fueron de $2,400 \pm 240$ GtCO₂. De estas, más de la mitad (58%) ocurrieron entre 1850 y 1989 [$1,400 \pm 195$ GtCO₂], y alrededor del 42% entre 1990 y 2019 [$1,000 \pm 90$ GtCO₂] (IPCC, 2022), es decir, en las últimas tres décadas, originando un claro aumento en la concentración atmosférica de CO₂ como se muestra en la Figura 12.7.

Antes de la era industrial, alrededor del año 1750, la concentración de CO₂ atmosférico fue de 280 ± 10 ppm durante varios miles de años (IPCC, 2001). Sin embargo, a partir del inicio de la era industrial la concentración de CO₂ fue incrementando a diferentes tasas de crecimiento, presentando valores más significativos a partir de la década de 1960 como se muestra continuación.

Tasa de crecimiento de CO₂ (NOAA, 2023e):

- Década de 1960, 0.6 ± 0.1 ppm por año
- Década de 1980, 1.6 ppm por año
- Década de 1990, 1.5 ppm por año
- Década de 2012-2022, 2.4 ppm por año
- Enero de 2022 a Enero de 2023, 2.19 ± 0.08 ppm

Alcanzando así, una concentración atmosférica de CO₂ de 419.51 ppm en junio de 2023 (NOAA, 2023f), lo cual ha influido en la intensificación del efecto invernadero y en el consecuente calentamiento global y cambio climático, los cuales ya han sido expuestos en secciones anteriores.

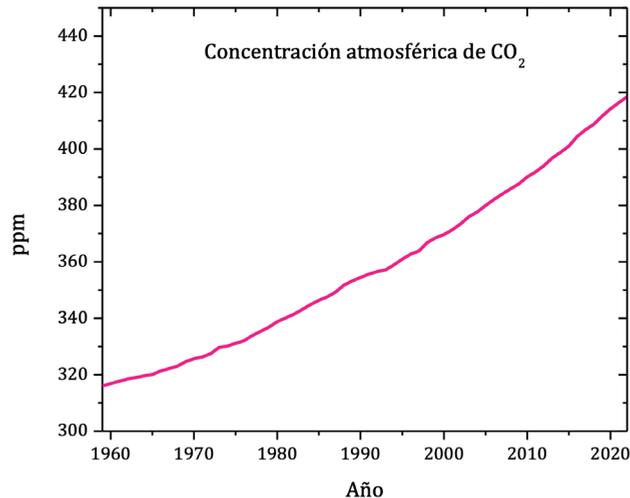


Figura 12.7 Aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera (adaptado de Tans y Keeling, 2023).

12.9 Alternativas de reducción de las emisiones de CO₂

Más allá de monitorear el CO₂ y evaluar sus variaciones y tendencias a largo plazo, se debe reducir sus emisiones con la finalidad de mitigar sus efectos sobre el calentamiento global y cambio climático. Para ello se requiere establecer diversas políticas y acciones, así como, implementar una serie de tecnologías que permitan continuar con el desarrollo económico pero a un menor impacto ambiental.

Entre los enfoques para reducir las emisiones de CO₂ se encuentran: aumentar el uso de combustibles bajos en carbono, incluyendo gas natural e hidrógeno, aplicar enfoques de forestación y reforestación, mejorar la eficiencia energética, promover la conservación de la energía, desplegar energía renovable, como energía solar, eólica, hidroeléctrica y bioenergía, y capturar y almacenar CO₂ (Leung *et al.*, 2014).

Estos enfoques han sido implementados y continúan en desarrollo, siendo la captura y almacenamiento una de las alternativas con mayor potencial. La captura y almacenamiento de CO₂ incluye una serie de tecnologías que permiten que el CO₂ se separe y se almacene para reducir las emisiones a gran escala (Yu *et al.*, 2008).

Tradicionalmente existen tres métodos para la captura de CO₂ (Yaashikaa *et al.*, 2019; Lyons *et al.*, 2021):

- **Precombustión:** Este método consiste en eliminar el carbono de forma previa a la combustión, a través de la conversión del combustible en gas de síntesis, el cual contiene alrededor del 40% de H₂ y CO₂, así como CO y en menor cantidad gases como el metano.
- **Oxi-combustión:** Se basa en una combustión más eficiente del carbón al sustituir el aire por oxígeno.
- **Postcombustión:** Este método implica la separación del CO₂ de los demás gases que se producen en la combustión.

En décadas recientes, también se ha indicado la captura directa del CO₂ del aire (DAC, por sus siglas en inglés), la cual se puede llevar a cabo en cualquier lugar y momento, obteniendo como beneficio la disponibilidad del CO₂ en el sitio de reuso o en el sitio de almacenamiento y por lo tanto, suprime el costo de transporte. El inconveniente es que requiere tres veces más energía que la captura de CO₂ postcombustión (Feron, 2019).

Las tecnologías de captura de CO₂ postcombustión tienen menor impacto económico que el de las demás opciones; para recuperar el CO₂ de los gases mixtos de postcombustión se requiere de procesos de absorción, adsorción, separación por destilación criogénica o membranas, entre otras (Al-Mamoori *et al.*, 2017). El proceso más utilizado es el de absorción con alquilaminas, en particular con monoetanolamina (MEA) (Hunt *et al.*, 2010).

Una vez separado el CO₂ existen diferentes opciones para almacenarlo. Entre ellas se encuentran el almacenamiento geológico que puede realizarse ya sea en yacimientos de gas y petróleo, en yacimientos salinos profundos o en yacimientos de carbón que no

sean factibles de explotación; también se puede realizar la inyección directa de CO₂ en el océano a profundidades mayores de 1,000 m, de esta forma, la mayor parte del CO₂ queda separada de la atmósfera. Otras opciones son la carbonatación mineral donde el CO₂ se convierte en carbonatos inorgánicos sólidos y el uso industrial, donde el CO₂ puede ser utilizado como materia prima para la obtención de productos químicos o ser utilizado de forma directa (IPCC, 2005).

Dentro del uso directo, el CO₂ tiene aplicación en bebidas carbonatadas, en alimentos, en la industria agroquímica, en la soldadura, en extintores de incendios, en propulsores, o como fluido/disolvente en varios procesos como secado-limpieza, separación, tratamiento de agua, embalaje, entre otros. También, el CO₂ supercrítico tiene aplicación como disolvente para reacciones de separación, síntesis de nano partículas o compuestos y modificación de polímeros (Huang y Tan, 2014).

En cuanto a su conversión, las reacciones de CO₂ se clasifican en dos clases, clase A, si el CO₂ es incorporado como tal en el producto y clase B, si se convierte en una de sus formas reducidas. Entre los productos químicos de la clase A destacan los carbonatos inorgánicos, carbonatos orgánicos, policarbonatos, carbamatos, entre otros. Sin embargo, los productos de la clase B son económicamente más atractivos al ser combustibles como el metano, metanol, hidrocarburos superiores, entre otros (Aresta *et al.*, 1995).

Bajo este contexto, la obtención de productos hidrogenados es una de las alternativas de conversión de CO₂ más importante debido a que permite dar un paso hacia el desarrollo sostenible de los sectores ambiental y energético, ya que además de reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, permite la obtención de productos químicos y combustibles como el metanol y los hidrocarburos, los cuales se almacenan y transportan fácilmente y son excelentes combustibles en motores de combustión interna (Saeidi *et al.*, 2014). Debe mencionarse que en productos en los cuales el CO₂ se fija temporalmente como es el caso de los combustibles líquidos, al ser utilizados se generan nuevamente emisiones; sin embargo, esas emisiones pueden ser reintroducidas al proceso de reciclaje.

Entre los posibles procesos químicos que pueden usarse para la conversión y utilización de CO₂, se encuentran la catálisis heterogénea u homogénea, reducción fotoquímica y foto catalítica, conversión bioquímica y enzimática, conversión electroquímica y electro catalítica, así como procesos solar-térmicos/catalíticos, entre otros (Song, 2002; Zheng *et al.*, 2017). Destacando entre ellos, la catálisis, considerada como un pilar de la química verde que permite reducir el consumo energético y la formación de productos no deseados en los procesos en los cuales tiene aplicación.

En la Figura 12.8 se muestra un esquema de las aplicaciones del CO₂, los procesos de conversión y los productos derivados de su conversión.

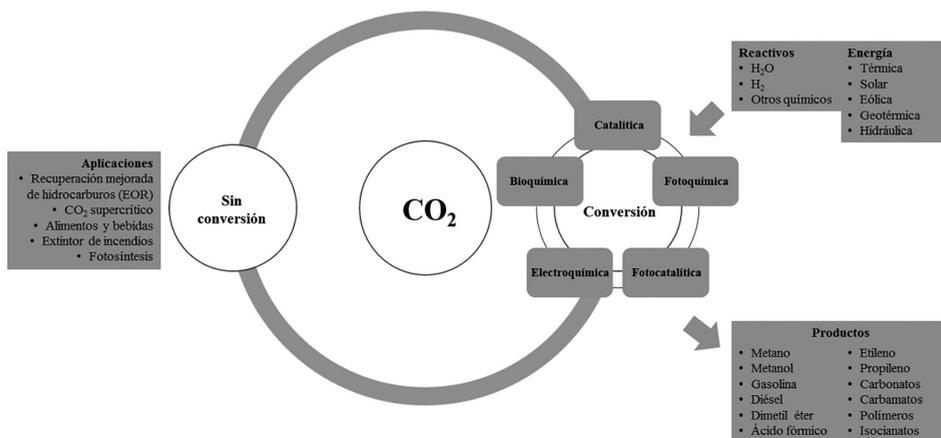


Figura 12.8 Aplicaciones del CO₂ y productos derivados de su conversión.

12.10 Reflexiones y conclusiones

Como se ha mencionado en este capítulo, el CO₂ es un gas que se encuentra de forma natural en el planeta como parte de ciclo del carbono. Es una molécula química con características fisicoquímicas específicas de suma importancia para la vida y el desarrollo industrial. Sin embargo, a causa de diversas actividades humanas, ahora también es el principal GEI de origen antropogénico, el cual ha tenido una gran influencia en la intensificación del efecto invernadero y en el consecuente calentamiento global y cambio climático.

Reducir las emisiones de CO₂ se ha convertido en una prioridad para lograr nuevamente un equilibrio del ciclo de carbono, siendo objetivo tener emisiones netas cero. Si bien es importante implementar acciones para reducir las emisiones de CO₂ como usar combustibles con bajo contenido de carbono, programas de reforestación y el desarrollo de energías renovables, por mencionar algunas, se abre otra área de oportunidad con la captura y utilización del CO₂.

Utilizar el CO₂ capturado como materia prima para la obtención de productos de valor agregado que fijen temporal o permanentemente el CO₂ resulta una alternativa atractiva, ya que podría simular lo que ocurre de forma natural con el ciclo del carbono, es decir, realizar un reciclaje de carbono y de esta forma dar paso a una economía circular. Donde, los ingresos generados a partir del CO₂ utilizado compensen una parte del costo de su captura. Sin embargo, para incrementar el interés de desarrollo e implementación de esta tecnología se debe asegurar un beneficio económico, ambiental y social para motivar a las industrias, inversionistas, tomadores de decisiones, investigadores y a la sociedad en general a realizar la transición a la economía circular del carbono.

La alternativa de uso y conversión del CO₂ podría reducir sus emisiones y dar un paso hacia el objetivo de emisiones netas cero. No obstante, esta acción, debe ser complementaria a las otras acciones planteadas para este fin, y lo más importantes es que las tecnologías para su uso y conversión deben asegurar un bajo impacto ambiental.

Con lo anterior se pretende tener otro enfoque respecto al CO₂ antropogénico, que consiste en darle el valor que tiene como molécula química, pero sin olvidar que lo ideal es reducir sus emisiones desde la fuente, y en el mejor de los casos, evitarlas.

Para finalizar, se reitera la importancia del CO₂ para la vida en el planeta, por lo tanto, se debe mantener su circulación natural, pero evitando que las interferencias humanas desequilibren por completo este ciclo, sobre todo por las implicaciones climáticas que amenazan los ecosistemas y a la biodiversidad incluida a la humanidad.

Referencias

1. Ahluwalia, V. K. (2017). Chemical and Photochemical Reactions in the Atmosphere. En *Advanced environmental chemistry* (pp. 49-66). Nueva Delhi, India. TERI Press.
2. Al-Mamoori, A., Krishnamurthy, A., Rownaghi, A., y Rezaei, F. (2017). Carbon Capture and Utilization Update. *Energy Technology*, 5, 834-849. <https://doi.org/10.1002/ente.201600747>
3. Aresta, M., Quaranta, E., Tommasi, I., Giannoccaro, P., y Ciccacese, A. (1995). Enzymatic versus chemical carbon dioxide utilization. Part I. The role of metal centres in carboxylation reactions. *Gazzetta chimica Italiana*, 125, 509.
4. Bertau, M., Offermanns, H., Plass, L., Schmidt, F., y Jürgen, H. (2014). *Methanol: The basic chemical and energy feedstock of the future*. Berlin, Alemania. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39709-7>
5. Bhattacharyya, P., Munda, S., y Dash, P. K. (2020). Greenhouse gases emissions. En *Climate Change and greenhouse gases emissions* (pp. 27-52). Nueva Delhi, India. New India Publishing Agency.
6. Boehm, S., Jeffery, L., Levin, K., Hecke, J., Schumer, C., Fyson, C., Majid, A., Jaeger, J., Nilsson, A., Naimoli, S., Thwaites, J., Cassidy, E., Lebling, K., Sims, M., Waite, R., Wilson, R., Castellanos, S., Singh, N., Lee, A. y Geiges A. (2022). *State of Climate Action 2022*. Berlin and Cologne, Germany, San Francisco, CA, and Washington, DC: Bezos Earth Fund, Climate Action Tracker, Climate Analytics, ClimateWorks Foundation, NewClimate Institute, the United Nations Climate Change High-Level Champions, and World Resources Institute. <https://doi.org/10.46830/wriipt.22.00028>
7. Bogan, R. A. J., Ohde, S., Arakaki, T., Mori, I., y McLeod, C. (2009). Changes in Rainwater pH associated with Increasing Atmospheric Carbon Dioxide after Industrial Revolution. *Water, Air, and Soil Pollution*, 196, 263-271. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9774-0>
8. Buis, A. (2019). *The Atmosphere: Getting a Handle on Carbon Dioxide*. National Aeronautics and Space Administration. Global climate change. Vital signs of

- the planet. Recuperado el 10 de Agosto de 2023 de <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/>
9. CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2023). *Sistema de Monitoreo Satelital de Gases de Efecto Invernadero (GEI)*. Recuperado el 10 de Agosto de 2023 de <https://www.cepal.org/es/subtemas/cambio-climatico/sistema-monitoreo-satelital-gases-efecto-invernadero-gei>
 10. Crippa, M., Guizzardi, D., Banja, M., Solazzo, E., Muntean, M., Schaaf, E., Pagani F., Monforti-Ferrario, F., Oliver, J., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Grassi, G., Rossi, S., Jacome Felix Oom, D., Branco, A., San-Miguel-Ayanz, J. y Vignati, E. (2022). *CO₂ emissions of all world countries - JRC/IEA/PBL 2022 Report*. EUR 31182 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/730164>, JRC130363
 11. US EPA, United States Environmental Protection Agency. (2023). *Acid Rain*. Recuperado el 31 de Julio de 2023 de <https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>
 12. Feron, P. (2019). Growing interest in CO₂-capture from air. *Greenhouse gases: Science and technology*, 9(1), 3-5. <https://doi.org/10.1002/ghg.1850>
 13. Goel, S., y Agarwal, D. (2014). Carbon Dioxide. En P. Wexler (Ed.), *Encyclopedia of Toxicology* (tercera ed., pp. 675-677). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00269-4>
 14. Gomes, J. F. P. (2013). Introduction: problem situation on carbon dioxide emissions. En *Carbon dioxide capture and sequestration an integrated overview of available technologies* (pp. 1-9). USA. Nova Science Publishers, Inc.
 15. Huang, C. H., y Tan, C. S. (2014). A Review: CO₂ Utilization. *Aerosol and Air Quality Research*, 14, 480-499. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.10.0326>
 16. Hunt, A., Sin, E., Marriott, R., y Clark, J. (2010). Generation, Capture, and Utilization of Industrial Carbon Dioxide. *ChemSusChem*, 3, 306-322. <https://doi.org/10.1002/cssc.200900169>
 17. IEA, International Energy Agency. (2019). *Global energy and CO₂ status Report*. Paris. <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>, License: CC BY 4.0
 18. IEA, International Energy Agency. (2022). *CO₂ emissions from energy combustion and industrial processes, 1900-2021*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-from-energy-combustion-and-industrial-processes-1900-2021>, IEA. License: CC BY 4.0
 19. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, y C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGI_TAR_full_report.pdf
 20. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2005). *Carbon Dioxide Capture and Storage*. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, y L. A.

- Meyer (eds.]). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport.pdf
21. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf
 22. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, y T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>
 23. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Summary for Policymakers*. [P.R. Shukla, J. Skea, A. Reisinger, R. Slade, R. Fradera, M. Pathak, A. Al Khourdajie, M. Belkacemi, R. van Diemen, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, D. McCollum, S. Some, y P. Vyas, (eds.)]. En *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, y J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
 24. Khan, S. A., Khan, S. B., Khan, L. U., Farooq, A., Akhtar, K., y Asiri, A. M. (2018). Fourier Transform Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Application in Functional Groups and Nanomaterials Characterization. En S. K. Sharma (Ed.), *Handbook of Materials Characterization* (pp. 317-344). Cham, Suiza. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2>
 25. Leung, D., Caramanna, G., y Maroto, M. (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426-443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093>
 26. Lindsey, R. (2009). *Climate and Earth's Energy Budget*. National Aeronautics and Space Administration. Earth Observatory. Recuperado el 05 de Agosto de 2023 de <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance>
 27. Lindsey, R. (2020a). *Climate Change: Mountain glaciers*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado el 05 de Enero de 2023 de ht-

- [tps://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-mountain-glaciers](https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-mountain-glaciers)
28. Lindsey, R. (2020b). *Climate Change: Ocean Heat Content*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado el 05 de Enero de 2023 de <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-ocean-heat-content>
 29. Lindsey, R. (2022a). *Climate Change: Arctic sea ice summer minimum*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado el 05 de Enero de 2023 de <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-arctic-sea-ice-summer-minimum>
 30. Lindsey, R. (2022b). *Climate Change: Global Sea Level*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado el 05 de Enero de 2023 de <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>
 31. Lyons, M., Durrant, P., y Kochhar, K. (2021). *Reaching Zero with Renewables: Capturing Carbon*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Technical-Papers/IRENA_Capturing_Carbon_2021.pdf
 32. MacDonald, G. J. (1988). Scientific Basis for the Greenhouse Effect. *Journal of Policy Analysis and Management*, 7, 425-444. <https://doi.org/10.2307/3323722>
 33. Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., y Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Journal of Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897-2913. [https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))
 34. Modak, A., Bhanja, P., Dutta, S., Chowdhury, B., y Asim, B. (2020). Catalytic reduction of CO₂ into fuels and fine chemicals. *Green Chemistry*, 22, 4002-4033. <https://doi.org/10.1039/d0gc01092h>
 35. NASA, National Aeronautics and Space Administration. (2023). *World of Change: Global Temperatures*. Earth observatory. Recuperado el 25 de Septiembre de 2023 de <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures>
 36. NIH, National Institutes of Health (2015). *Hazardous Substances Data Bank, carbon dioxide*. National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information. Recuperado el 17 de Agosto de 2023 de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/source/hsdb/516>
 37. NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health. (2018). *First Aid Procedures for Chemical Hazards, carbon dioxide*. Centers for Disease Control and Prevention. Recuperado el 17 de Agosto de 2023 de <https://www.cdc.gov/niosh/npg/firstaid.html>
 38. NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health. (2019). *Pocket Guide to Chemical Hazards, carbon dioxide*. Centers for Disease Control and Prevention. Recuperado el 17 de Agosto de 2023 de <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0103.html>

39. NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2020). *Ocean acidification*. Recuperado el 05 de Agosto de 2023 de <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification>
40. NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023a). *National Centers for Environmental Information, Climate at a Glance: Global Time Series*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2023 de <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>
41. NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023b). *National Centers for Environmental Information, Monthly Global Climate Report for Annual 2022*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2023 de <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>
42. NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023c). *Carbon Cycle Greenhouse Gases. In-Situ Measurements*. Earth System Research Laboratories. Recuperado el 10 de Agosto de 2023 de <https://gml.noaa.gov/ccgg/insitu/>
43. NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023d). *What is the Global Greenhouse Gas Reference Network?*. Earth System Research Laboratories. Recuperado el 10 de Agosto de 2023 de <https://gml.noaa.gov/ccgg/about.html>
44. NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023e). *Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*. Global Monitoring Laboratory. Earth System Research Laboratories. Recuperado el 28 de Septiembre de 2023 de <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>
45. NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023f). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Growth Rates. Annual Mean Global Carbon Dioxide*. Global Monitoring Laboratory. Earth System Research Laboratories. Recuperado el 25 de Septiembre de 2023 de <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>
46. North, M. (2015). What is CO₂? Thermodynamics, Basic Reactions and Physical Chemistry. En P. Styring, E. A. Quadrelli, y K. Armstrong (Eds.), *Carbon Dioxide Utilisation: Closing the Carbon Cycle* (Primera ed., pp. 3-17). Países Bajos. Elsevier.
47. Oppenheimer, M. A.-H., Jesse K. . (2016). The Science of Climate Change. *The Future of Children* 26(1), 11-30. <https://doi.org/10.1353/foc.2016.0001>
48. Payne, V. (2022). *Medición del Dióxido de Carbono Atmosférico desde el Espacio en Apoyo a los Estudios Relacionados con el Clima: La Medición del XCO₂ desde OCO-2 y OCO-3*. National Aeronautics and Space Administration. NASA's Applied Remote Sensing Training Program 2. Recuperado el 10 de Agosto de 2023 de https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2022-05/XCO2_Part1_Spanish_final.pdf
49. Ritchie, H., y Roser, M. (2020). *CO₂ and greenhouse gas emissions*. Our World in Data. Recuperado el 15 de Julio de 2023 de <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#global-warming-potential-of-greenhouse-gases>

50. Saeidi, S., Saidina, N., y Reza, M. (2014). Hydrogenation of CO₂ to value-added products. A review and potential future developments. *Journal of CO₂ utilization*, 5, 66-81. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2013.12.005>
51. SEMARNAT e INECC, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2022). *México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 1990-2019*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/InventarioGEI_Mexico_1990_2019.pdf
52. Shine, K. P., y Sturges, W. T. (2007). Atmospheric science: CO₂ Is Not the Only Gas. *Science*, 315, 1804-1805. <https://doi.org/10.1126/science.1141677>
53. Skoog, D. A., Holler, F. J., y Crouch, S. R. (2017). Theory of IR Absorption Spectrometry. En *Principles of instrumental analysis* (Séptima ed., pp.389). USA. Cengage Learning.
54. Song, C. (2002). CO₂ conversion and utilization: An overview. En *CO₂ Conversion and Utilization: An Overview* (Vol. 809, pp. 2-30). American Chemical Society.
55. Taifan, W., Boily, J.-F., y Baltrusaitis, J. (2016). Surface chemistry of carbon dioxide revisited. *Surface Science Reports*, 71(4), 595-671. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2016.09.001>
56. Tans, P. y Keeling, R. (2023). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Data. Mauna Loa CO₂ annual mean data (CSV)*. Global Monitoring Laboratory. Earth System Research Laboratories. Recuperado el 25 de Septiembre de 2023 de <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html>
57. Yu, K. M. K., Curcic, I., Gabriel, J. y Tsang, S. C. E. (2008). Recent advances in CO₂ capture and utilization. *ChemSusChem*, 1(11), 893-899. <https://doi.org/10.1002/cssc.200800169>
58. Tuckett, R. (2019). Greenhouse Gases. En P. Worsfold, A. Townshend, C. Poole, y M. Miró (Eds.), *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering. Encyclopedia of Analytical Science* (Tercera ed., Vol. 4, pp. 362-372). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14031-4>
59. Yaashikaa, P. R., Senthil, K., Varjanic, S. J., y Saravanand, A. (2019). A review on photochemical, biochemical and electrochemical transformation of CO₂ into value-added products. *Journal of CO₂ utilization*, 33, 131-147. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.017>
60. Zheng, Y., Zhang, W., Li, Y., Chen, J., Yu, B., Wang, J., Zhang, L. y Zhang, J. (2017). Energy related CO₂ conversion and utilization: Advanced materials/nanomaterials, reaction mechanisms and technologies. *Nano Energy*, 40, 512-539. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.08.049>