Química de los contaminantes atmosféricos

Violeta Mugica Álvarez
Editora

CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

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

CACCM

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 Popocatépetl. 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
José de Jesús Figueroa Lara
Karina Landeros Mugica

Capítulo 2. Dióxido de azufre 45
Angélica Neria Hernández
Araceli Amaya Chávez
Rodrigo Castañeda Sandoval
Carlos Aguirre Campuzano

Capítulo 3. Óxidos de nitrógeno 73
Mario Alfonso Murillo Tovar
José de Jesús Díaz Torres
Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña

Capítulo 4. Ozono 99
Claudia Adriana Martínez Reyes

Capítulo 5. Partículas atmosféricas 117
Brenda Liz Valle Hernández
Fernando Millán Vázquez
Yatziry Montes Gorgua

Capítulo 6. Hidrocarburos aromáticos policíclicos .. 139
Brenda Liz Valle Hernández
Yatziry Montes Gorgua

Capítulo 7. Metales en partículas atmosféricas:
el plomo un caso de estudio 161
Juan Carlos Sánchez Meza

Capítulo 8. Lluvia ácida 187
Rodolfo Sosa Echeverría
Ana Luisa Alarcón Jiménez
Pablo Sánchez Álvarez
Mónica Jaimes Palomera

Capítulo 9. Control químico de contaminantes de fuentes móviles 203
Miguel Torres Rodríguez
Mirella Gutiérrez Arzaluz

Capítulo 10. Control de dióxido de azufre en fuentes fijas 223
Griselda González Cardoso
Alfonso Espitia Cabrera

Capítulo 11. Control de óxidos de nitrógeno en fuentes fijas 245
Alfonso Espitia Cabrera
Griselda González Cardoso

Capítulo 12. Dióxido de carbono 261
Dalia Santa Cruz Navarro
Miguel Torres Rodríguez

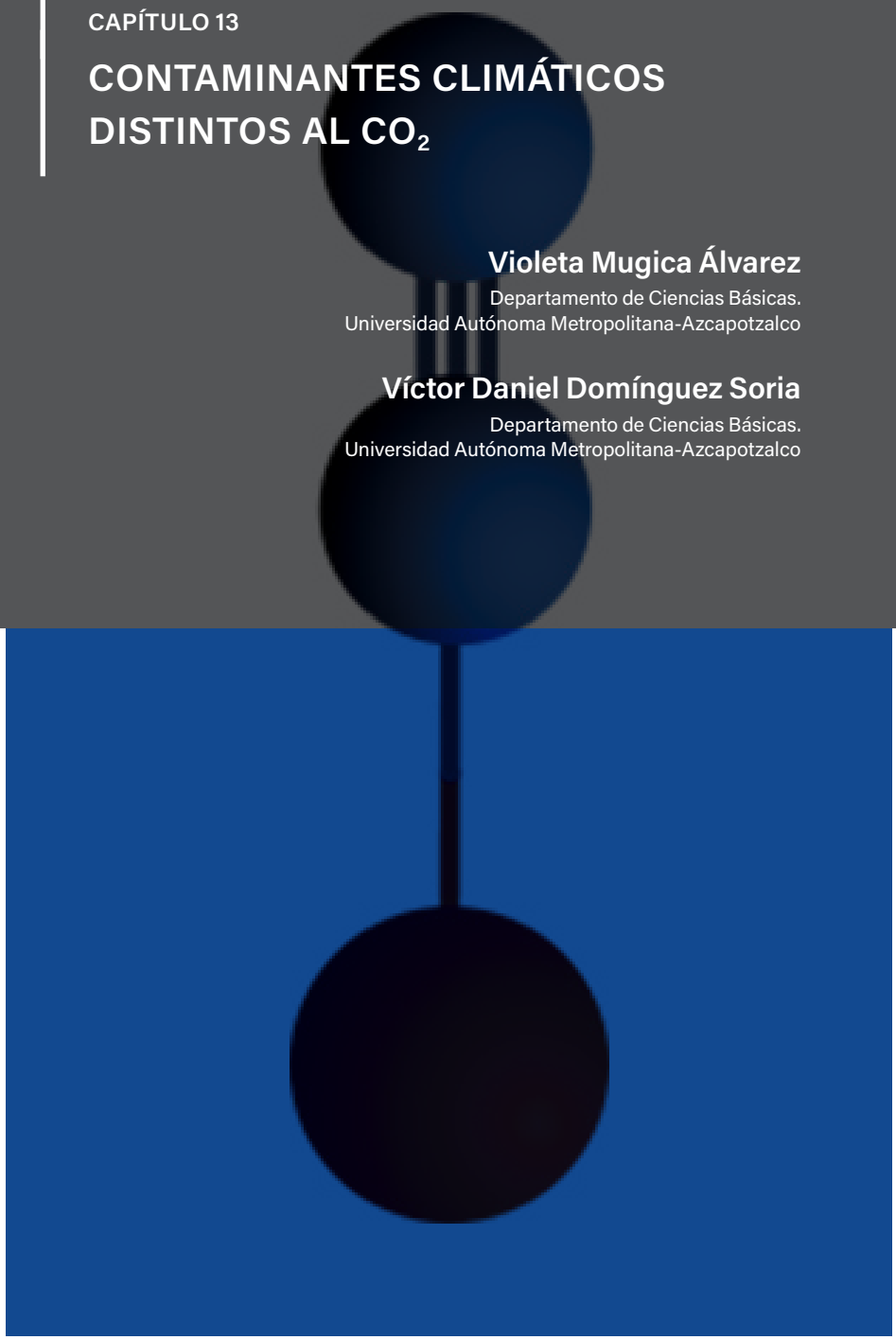
Capítulo 13. Contaminantes climáticos distintos al CO_2 289
Violeta Mugica Álvarez
Víctor Daniel Domínguez Soria

CAPÍTULO 13

CONTAMINANTES CLIMÁTICOS DISTINTOS AL CO_2

Violeta Mugica Álvarez
Departamento de Ciencias Básicas.
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

Víctor Daniel Domínguez Soria
Departamento de Ciencias Básicas.
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco



13.1 Introducción

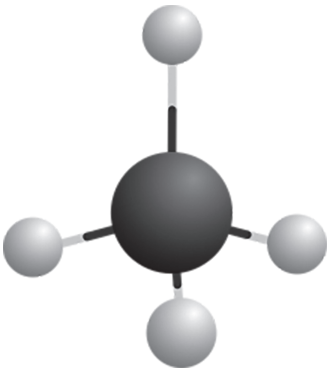
El Protocolo de Kioto menciona seis gases climáticos de interés: el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), el hexafluoruro de azufre (SF_6), los perfluorocarbonos (PFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC). Estos contaminantes climáticos tienen la capacidad de absorber la radiación infrarroja o calor que emana de la tierra, ocasionando el calentamiento de la atmósfera baja, denominado "efecto invernadero". Otros compuestos invernadero considerados en las últimas décadas son el carbono negro u hollín y los gases invernadero indirectos como el ozono y el monóxido de carbono. El CH_4, los HFCs y el carbono negro son contaminantes climáticos de vida corta (CCVC) porque tienen un tiempo de vida relativamente corto, en comparación del CO_2. Adicionalmente, el N_2O y los HFC pueden llegar a la estratósfera transportados por el viento y participar en la destrucción de la capa de ozono.

13.2 Propiedades fisicoquímicas

Las propiedades de los gases invernadero que se encuentran en la naturaleza (CH_4 y N_2O) se presentan en la Tabla 13.1 y 13.2, y en la Tabla 13.3 se muestran las propiedades de los gases invernadero sintéticos.

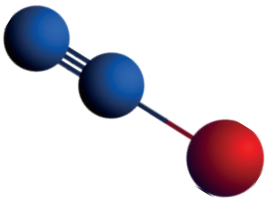
El metano tiene cuatro enlaces covalentes fuertes por lo que en condiciones estándares la molécula se mantiene estable; estos enlaces almacenan energía potencial en forma de energía de enlace, la cual puede liberarse cuando el metano reacciona de forma exotérmica con el oxígeno al aplicar calor, chispa o llama, liberando una gran cantidad de energía, por lo que es un combustible muy utilizado. Al ser más ligero que el aire y poco soluble en agua, el metano sube a las capas superiores de la atmósfera y se dispersa. Es un contaminante de vida corta porque permanece en la atmósfera entre 10 y 15 años (Zaelke, 2013).

Tabla 13.1 *Propiedades fisicoquímicas del metano.*

Molécula	Propiedad	Valor
	Fórmula molecular	CH_4
	Peso molecular	16.04 g/mol
	Propiedades físicas	Incoloro e inodoro
	Punto de ebullición	-161.6 °C
	Energía de enlace	101.1 kcal/mol (423.0 kJ/mol)
	Longitud de enlace	1.10 Å
	Densidad	0.657 kg/m^3
	Solubilidad	Poco soluble en agua (22.7 mg/L)
	Inflamabilidad	Extremadamente inflamable
	Capacidad Calorífica	35.69 J $(K{\cdot}mol)^{-1}$

El óxido nitroso tiene un peso molecular más alto que el oxígeno y su densidad es mayor a la del aire, por lo que tiende a permanecer en la parte baja de la atmósfera. La molécula es muy estable, no reacciona en condiciones estándares y se descompone a más de 560 °C. Su tiempo de vida media es de 114 años por lo que permanece mucho tiempo en la atmósfera (Trogler, 1999). Al ser soluble en grasa puede traspasar la barrera cerebro-encefálica e inducir la pérdida del conocimiento temporal por lo que se aplica mezclado con oxígeno como anestésico y se le conoce como gas hilarante (provoca risa).

Tabla 13.2 *Propiedades fisicoquímicas del óxido nitroso.*

Molécula	Propiedad	Valor
	Fórmula molecular	N_2O
	Peso molecular	44.01 g/mol
	Punto de fusión	−11.2 °C (262 K)
	Punto de ebullición	21.2 °C (294 K)
	Longitud de enlace	Es una molécula plana con enlace N-N con una distancia de 1.78 Å y N-O con distancias de 1.19 Å
	Densidad	1.449 kg/m^3
	Solubilidad	Soluble en agua y en grasas
	Inflamabilidad	No Inflamable
	Capacidad calorífica	880 J/g K

Los contaminantes climáticos fluorados que se utilizan actualmente en el mundo, fueron sintetizados a lo largo del siglo pasado, a partir de los años 30 e incluyen a los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos

(PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF_6) (Tabla 13.3). Los primeros compuestos fluorados sintetizados fueron los clorofluorocarbonos (CFC), los cuales presentan una gran estabilidad, no son tóxicos, ni inflamables y tienen gran capacidad calorífica por lo que tienen una gran cantidad de aplicaciones; sin embargo, en los años 60 se descubrió que estos compuestos destruían la capa de ozono, por lo que los líderes de los países asociados a la Organización de las Naciones Unidas (OMS) firmaron en 1987 el Protocolo de Montreal, que es un acuerdo inédito de colaboración internacional, en el cual se acordó eliminar gradualmente la producción y consumo de los CFC con el fin de proteger la capa de ozono; prohibiendo su producción y consumo en los países desarrollados a partir del año 2000, mientras que los países en desarrollo tuvieron plazos más largos para su cumplimiento (Benhadid-Dib y Benzaoui, 2012), aunque los CFC liberados a la atmósfera antes del año 2000 permanecerán en el planeta por mucho tiempo y continuarán agotando la capa de ozono.

Los CFC fueron sustituidos por los HCFC, que al contener átomos de hidrógeno son menos estables y pueden degradarse antes de llegar a la estratósfera; sin embargo, al ser también sustancias agotadoras de la capa de ozono, fueron regulados en 2016 con la Enmienda Kigali al Protocolo de Montreal, donde se acordó la suspensión total de su consumo en el mundo para 2018 (Polonara *et al*., 2017), por lo que actualmente los sustitutos más utilizados son los hidrofluorocarbonos (HFC) que se muestran en la Tabla 13.3 los cuales son casi inocuos para la capa de ozono, al no contener cloro.

A raíz del desarrollo de la tecnología electrónica y para el control de incendios, los PFC se sintetizaron a partir de los años 40, mientras que el SF_6 se sintetizó a inicios del siglo XX y se aplica en instalaciones eléctricas, como aislantes en interruptores y equipos de distribución de energía; otro compuesto utilizado en la producción de semiconductores es el trifluoruro de nitrógeno (NF_3); todos estos compuestos no agotan la capa de ozono, pero son químicamente muy estables en condiciones normales de temperatura y presión, no son ni inflamables ni reactivos, pero pueden perdurar mucho tiempo en la atmósfera y contribuir al cambio climático durante siglos (Dunse *et al*., 2019).

Tabla 13.3 *Propiedades fisicoquímicas de los compuestos fluorados.*

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	Punto de ebullición	Densidad	PCG (GWP)	Uso
HFC-23	CHF_3	70 g/mol	-82 °C	2.87 g/l	12,400	Industria del flúor
HFC-410A	50% CH_2F_2	52.03 g/mol	-51.6 °C	2.18 g/l	1,924	Refrigeración
	50% CF_3CHF_2	120.02 g/mol	-48.2 °C	5.05 g/l		
HFC-134A	F_3CCH_2F	102 g/mol	-26.2 °C	4.25 g/l	1,300	Refrigeración, propelente, espumante

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	Punto de ebullición	Densidad	PCG (GWP)	Uso
HFC-404A	CHF_2CF_3, CH_3CF_3, CH_2FCF_3	120 g/mol	- 47.8 °C	4.9 g/l	3,943	Refrigeración
HFC-245fa	$C_3H_3F_5$	134.06 g/mol	15.3 °C	21.18 g/l		Espumante, propelente
CF_4	CF_4	88.00 g/mol	-127.8 °C	3.67 g/l	6,630	Electrónica
SF_6	SF_6	146.06 g/mol	-64 °C	6.17 g/l	11,100	Electrónica

PCG (GWP): Potencial de calentamiento global (Global Warming Potential).

El carbono negro es un material carbonoso amorfo que forma parte de los aerosoles atmosféricos y que corresponde a los componentes que absorben luz que contienen dos formas de carbono elemental con diferentes propiedades químicas y físicas dependiendo de las fuentes de origen (Janssen *et al*., 2012). El carbono elemental, es químicamente inerte y no reacciona con oxidantes potentes; al estar constituido por átomos de carbono presenta conductividad, aunque es baja en comparación con el grafito. Su estructura es de carbono muy porosa por lo que puede adsorber gases, substancias volátiles y agua. Es capaz de absorber luz en un amplio espectro de longitudes de onda, pero principalmente espectro visible y ultravioleta, por lo que posee un color negro característico del cual proviene su nombre (Long *et al*., 2013).

13.3 Química de los contaminantes climáticos

13.3.1 Metano

La química del CH_4 atmosférico es un proceso dinámico en el cual intervienen varios factores, principalmente la temperatura y la concentración de los radicales hidroxilo en la tropósfera que dominan su remoción de la atmósfera. En las reacciones fotoquímicas que suceden, pueden generarse radicales peroxilo que incrementan la formación del ozono troposférico, que es un gas forzador climático indirecto que contribuye al cambio climático (Van Amstel, 2012). Las reacciones con las cuales se remueven alrededor de 500 Tg de CH_4 se presentan en la siguiente secuencia, donde el compuesto final es el CO_2, que aunque también es un gas invernadero, tiene menor potencial de calentamiento que el metano:

$$CH_4 + OH\bullet \rightarrow CH_3OH \quad (13.1)$$

$$CH_3OH + OH\bullet \rightarrow CH_2OH\bullet + H_2O \quad (13.2)$$

$$CH_2OH\bullet + O_2 \rightarrow CH_2O + HO_2\bullet \quad (13.3)$$
$$CH_2O + OH\bullet \rightarrow HCO\bullet + H_2O \quad (13.4)$$
$$HCO\bullet + OH\bullet \rightarrow CO_2 + H_2O \quad (13.5)$$

Alrededor del 8% del CH_4 se degrada en la estratósfera con participación de la luz UV de mayor energía; asimismo, hasta un 6% puede removerse por las bacterias oxidantes del suelo y la superficie de los mares que utilizan el CH_4 como fuente de carbono y energía y lo oxidan a CO_2 (Stams y Plugge, 2010).

13.3.2 Óxido nitroso

El N_2O es un compuesto muy estable con carácter fuertemente reductor. Algunos NOx pueden reducirse a N_2O en lugar de convertirse en NO_2 en procesos de combustión con material catalítico, particularmente en zonas con poco oxígeno y en presencia de compuestos reductores como el CO y los hidrocarburos no quemados (Ecuación 13.6).

$$2NO + CO \rightarrow N_2O + CO_2 \quad (13.6)$$

Como el estado de oxidación del nitrógeno en el N_2O se encuentra en medio de los dos extremos redox, podría formarse por nitrificación, aunque el segundo proceso es el más relevante; durante la desnitrificación natural, las bacterias desnitrificantes utilizan los nitritos como aceptores de electrones en lugar de oxígeno. En este proceso, algunos de los intermediarios reactivos en condiciones anaeróbicas (zonas inundadas) pueden convertirse en N_2O en lugar de N_2. Los fertilizantes sintéticos muy solubles promueven una mayor producción de nitratos y nitritos y finalmente de óxido nitroso. Si se maneja adecuadamente la humedad puede lograrse minimizar las condiciones anaeróbicas y evitar la pérdida de nitrógeno como N_2O. La desnitrificación en suelos y océanos también contribuye a la eliminación del N_2O atmosférico convirtiéndolo en nitrógeno (Ecuación 13.7) (Trogler *et al*., 1999).

$$NO_2 \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 \quad (13.7)$$

La reacción con los radicales hidroxilo es la principal forma de remover al N_2O de la tropósfera de acuerdo a la siguiente reacción, aunque se lleva a cabo muy lentamente:

$$N_2O + OH\bullet \rightarrow N_2 + H_2O \quad (13.8)$$

Debido a la circulación en la atmósfera, las moléculas de N_2O pueden ser transportadas a la estratósfera, donde la radiación UV las rompe en NO y NO_2 (Ecuación 13.9 y 13.10), que contribuyen a la destrucción de la capa de ozono.

$$N_2O + UV \rightarrow NO + O_2 \quad (13.9)$$
$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (13.10)$$

Aunque también la luz UV lo puede descomponer en nitrógeno y ozono de acuerdo a la siguiente reacción:

$$N_2O + UV \rightarrow N_2 + O_3 \tag{13.11}$$

Como el tiempo de vida media del N_2O en la atmósfera es mayor a los 100 años, permanece mucho tiempo en la atmósfera contribuyendo tanto al efecto invernadero como a la destrucción de la capa de ozono (IPCC, 2019).

13.3.3 Compuestos fluorados

El principal mecanismo de destrucción de los HCFC y de los HFC es en la estratósfera a través de reacciones de fotodisociación ocasionadas por la radiación UV; en el primer caso se producen radicales cloro o flúor, que pueden agotar la capa de ozono, en tanto que en el caso de los CFC se liberan radicales libres de flúor que pueden reaccionar con otros radicales como el OH• y formar fluoroacetatos estables, el tiempo de vida media promedio de los HFC es de 15 años (Ehhalt *et al*., 2001). Los PFC tienen enlaces muy fuertes C-F con muy altas energías de enlace, que no se rompen ni con radiación UV muy energética; al no tener átomos de hidrógeno en la molécula no pueden ser oxidados por lo que son muy resistentes y prácticamente indestructibles; asimismo, no son solubles en agua, por lo que tampoco son removidos por la lluvia, por lo que permanecen durante siglos en la atmósfera (Dervash *et al*., 2022; Dunse *et al*., 2018; Ehhalt *et al*., 2001).

En el caso de algunos HCFC y HFC, pueden degradarse a ácido fluoroacético, conocido como TFA (por sus siglas en inglés), entre ellos se encuentran el HCFC-123, HCFC-124, HFC-134a y el HFC-143. Por ejemplo el HFC-134a, C_2F_4 al reaccionar en la atmósfera con O_3 y/o radicales OH• produce el ácido trifluoroacético (TFA) CF_3COOH, que es un ácido relativamente fuerte que puede ocasionar algún efecto adverso en especies acuáticas (Solomon *et al*., 2016).

13.3.4 Carbono negro

El carbono negro es un contaminante ubicuo que se forma por la combustión incompleta de combustibles fósiles en condiciones pirolíticas, es decir con deficiencia de oxígeno; durante este proceso, las moléculas del combustible se oxidan parcialmente y tienen reacomodos formando partículas carbonáceas muy finas que pueden ser esféricas o de forma irregular, las cuales pueden colisionar y fusionarse para formar aglomerados más grandes, desde cadenas sencillas hasta agregados en forma de fractales; no debe confundirse con el negro de carbón o negro de humo que es un producto manufacturado industrialmente en condiciones controladas, con agregados de carbono en forma de racimos de partículas esféricas fusionadas, en contraste, el carbono negro es un producto no deseado producido en la combustión incompleta de combustibles o biomasa (Watson y Valberg, 2001; Long *et al*., 2013).

13.3.5 Contaminantes climáticos indirectos

Los cambios en la composición de la atmósfera y la química de las especies presentes han alterado el forzamiento radiativo de las emisiones humanas, a través de múltiples reacciones fotoquímicas que modifican los tiempos de vida media de los gases invernadero; de hecho, diversas publicaciones muestran la dificultad y la incertudumbre en las estimaciones del forzamiento radiativo de diversas especies, que conducen a los distintos valores de potenciales de calentamiento global (Myhre *et al*., 2013; Etminan *et al*., 2016).

Aunque el monóxido de carbono (CO) no atrapa la radiación infrarroja, se le considera un contaminante o forzador climático indirecto porque participa en una serie de reacciones fotoquímicas con el OH que involucran al CH_4, al formaldehído (CH_2O), al O_3 y al CO_2, que convierten al CO en precursor del ozono y afecta la abundancia y el tiempo de vida media del metano; se ha estimado que esta serie de reacciones ocasionan un forzamiento radiativo positivo indirecto de 0.2 W m^{-2} (Myhre *et al*., 2013; Lelieveld *et al*., 2016; Zheng *et al*., 2019).

El ozono troposférico es un contaminante criterio que afecta a la salud y el rendimiento en la producción de diversos cultivos, pero también es considerado un contaminante climático de vida corta, ya que solamente tiene duración de algunas horas. Este contaminante tiene la capacidad para atrapar calor en la atmósfera cercana a la superficie terrestre y su participación en reacciones químicas que pueden tener efectos locales de calentamiento y por ello contribuye al calentamiento global (Harmsen *et al*., 2015). Sin embargo, su contribución en comparación con otros contaminantes climáticos y gases de efecto invernadero es relativamente menor. Debido a lo anterior, el control de los precursores de ozono, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles, incluyendo al metano, no solamente tiene beneficios para la salud de las personas, sino también en el combate al cambio climático (Ortúzar y Tornel, 2016).

13.4 Efecto invernadero

La temperatura global de la superficie del planeta ha tenido un incremento mayor desde 1970, que en ningún otro periodo de 50 años en los pasados 2000 años, con mayores aumentos en la tierra que en los océanos; aunque los aerosoles y las emisiones volcánicas contribuyen, por su parte, al enfriamiento de la temperatura global de la superficie del planeta; el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) reportó que entre 1901 y 2012 el aumento de la temperatura global fue de 0.85 °C (IPCC, 2023). Si bien se atribuye el incremento en la temperatura global al aumento del CO_2 principalmente, los demás contaminantes climáticos que tienen una mayor capacidad para atrapar el calor en la atmósfera y regresarlo a la tierra, tienen una contribución importante del 25% (IPCC, 2020).

El efecto invernadero es un proceso natural que ha existido en la Tierra durante millones de años que permite que la atmósfera retenga parte del calor del Sol y es esencial

para mantener la temperatura del planeta en niveles adecuados para la vida. El efecto invernadero forma parte del balance energético de la tierra La radiación proveniente del Sol llega a la Tierra en forma de luz visible y radiación ultravioleta, parte de ella se refleja por las nubes y la superficie de la tierra y otra parte es absorbida por la superficie terrestre y emitida nuevamente a la atmósfera en forma de calor (radiación infrarroja). El vapor de agua (H_2O), es capaz de atrapar la radiación infrarroja y regresarlo a la tierra, al igual que las pequeñas cantidades de CO_2, CH_4 y N_2O; este fenómeno, denominado "efecto invernadero" ha permitido tener una temperatura agradable y un planeta habitable porque hay un "forzamiento radiativo" positivo. Sin embargo, en el último siglo, las actividades humanas y en particular la quema de combustibles fósiles, han ocasionado que las concentraciones de las especies traza mencionadas, denominadas "gases invernadero", se hallan incrementado de tal forma que el calor que se mantiene en la atmósfera baja haya ocasionado un cambio climático en la tierra, por lo que desde hace varias décadas, el planeta presenta un "efecto invernadero acrecentado" (Wild *et al*., 2008).

En el capítulo anterior se mostró que a partir de la revolución industrial, el incremento de la concentración del CO_2 tiene una correlación con el incremento de la temperatura global. No obstante, el CH_4 y el N_2O, también tienen la capacidad de atrapar el calor y regresarlo a la tierra contribuyendo al incremento de la temperatura global, además, estas especies atrapan una mayor cantidad de calor que el CO_2, por lo que la contribución de cada gramo de estos gases invernadero, es mayor a la de un gramo de CO_2, es decir, tienen un mayor potencial de calentamiento. Asimismo, los clorofluorocarbonos, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, y otros compuestos fluorados mencionados anteriormente poseen potenciales de calentamiento entre mil y trece mil veces más altos que el CO_2. Finalmente, en las últimas cuatro décadas, se ha determinado que el carbono negro contenido en las partículas de hollín, calienta la atmósfera más intensamente que el CO_2, el CH_4 y el N_2O, y la evidencia sugiere que podría ser el contaminante que contribuye en segundo lugar al cambio climático, después del CO_2 (Ortúzar *et al*., 2016). Si el vapor de agua y las moléculas mencionadas no estuvieran presentes, toda la radiación infrarroja se emitiría al espacio (Wei *et al*., 2018).

13.4.1 Potencial de calentamiento global (PCG)

Para conocer la capacidad de calentamiento de los contaminantes climáticos se utiliza el "Potencial de Calentamiento Global" (PCG o GWP por sus siglas en inglés), el cual tiene como referencia al CO_2 con un valor de PCG = 1, que es el gas invernadero más conocido y el que se emite en mayor cantidad. El PCG es una medida de la eficiencia radiativa, es decir, a la capacidad de absorber y reemitir la radiación infrarroja en la atmósfera; esto depende de varios factores: a) las longitudes de onda en donde la molécula absorbe radiación IR, b) la energía relativa de dicha absorción (entre mayor es la cantidad de energía que absorbe, mayor será su fuerza radiativa o calentamiento), c) el tiempo de vida de la molécula, ya que entre más larga es, mayor tiempo permanecerá calentando. Este valor se calcula para un período de tiempo específico que puede ser de 20, 100 o 500 años. La Tabla 13.4 muestra los PCG de los principales gases y compuestos invernadero en un periodo de 100 años que se utilizan en México en sus estimaciones de

CO_2eq; por ejemplo, el caso del metano indica que, durante 100 años, una tonelada de este gas atrapará 28 veces más calor que una tonelada de CO_2 (iNDC, 2015); los cambios en la composición de la atmósfera y la química de las especies presentes han alterado el forzamiento radiativo de las emisiones, a través de múltiples reacciones fotoquímicas que modifican los tiempos de vida media de los gases invernadero; de hecho, diversas publicaciones muestran la dificultad y la incertudumbre en las estimaciones del forzamiento radiativo de las especies, que conducen a los distintos valores de potenciales de calentamiento global publicados (Etminan *et al*., 2016; Myhre *et al*., 2013; IPCC, 2018; Imasu *et al*., 1995). En la Tabla 13.3 se encuentran los PCG de los hidrofluorocarbonos y del perfluorocarbono más utilizados en México que es el CF_4, además del de hexafluoruro de azufre (SF_6), un compuesto invernadero que se comenzó a utilizar en los años 80.

Los potenciales de calentamiento global se utilizan universalmente para informar las emisiones totales de CO_2 equivalente. Para ello, se multiplica la masa de las emisiones de los gases invernadero por su potencial de calentamiento para reportarse como CO_2eq; al estar en las mismas unidades las cantidades pueden sumarse y reportarse como el total de emisiones de CO_2eq. Cabe mencionar que el carbono negro se reporta de manera independiente, pues no se ha establecido un valor de equivalencia del PCG como CO_2eq que sea aceptado universalmente; la fuerza radiativa que ejerce el contaminante depende de la concentración del contaminante y de su PCG para obtener la masa en CO_2eq (Mehmood *et al*., 2022).

Tabla 13.4 *Potenciales de Calentamiento Global (iNDC, México 2015).*

Compuesto	Fórmula	Vida media en la atmósfera (años)	PCG (GWP) en 100 años
Dióxido de carbono	CO_2	1	> 200
Metano	CH_4	12	28
Óxido nitroso	N_2O	121	265
HCFC-22	HCFC-22	11.9	1,760
HFC-134A	HFC-134A	13.4	1,300
Hexafluoruro de azufre	SF_6	3, 200	23,500
Carbono negro	CN	días	900

Los Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCVC) se marcan en color rojo.

Entre los compuestos invernadero, en la última década se ha incrementado la atención sobre los llamados "Contaminantes Climáticos de Vida Corta" (CCVC) o forzadores climáticos de vida corta. Un CCVC es un compuesto que tiene un impacto significativo en el clima de la Tierra, pero tiene una vida útil relativamente breve en la atmósfera

en comparación con los gases de efecto invernadero de larga duración, como el CO_2 (Zaeke, 2012). Los contaminantes climáticos de vida corta son el CH_4, algunos HCFC y el carbono negro; otros contaminantes como el O_3 son considerados contaminantes climáticos de vida corta indirectos, porque aunque no absorben la radiación infrarroja, contribuyen al calentamiento global (Ortúzar *et al*., 2016). Estos contaminantes tienen un impacto inmediato en el clima debido a su capacidad para influir en la radiación solar, la absorción de calor en la atmósfera y otros procesos climáticos; en los últimos años se ha sugerido que la reducción y control de los CCVC es crucial para mitigar el cambio climático en menor tiempo porque sus emisiones pueden reducirse con la tecnología existente (Victor-Gallardo *et al*., 2022; Premakumara *et al*., 2018).

13.4.2 Absorción de radiación infrarroja de los contaminantes climáticos distintos al CO_2

El mecanismo por el cual una molécula captura la radiación infrarroja o calor, se relaciona con el movimiento de los átomos debidos a distintos tipos de vibración, estiramiento y flexión de los enlaces de la molécula, lo que ocasiona que las cargas eléctricas de los átomos también se muevan, ocasionando cambios temporales en la distribución de los electrones de la molécula y modifica su momento dipolar (Mehmood *et al*., 2022; Green, 2007). Cuando la frecuencia vibratoria natural de los enlaces de una molécula coincide con la frecuencia de la radiación infrarroja, la molécula puede absorber dicha energía en forma de fotones lo que incrementa la energía interna de la molécula produciendo vibraciones más fuertes donde la longitud de enlace puede variar temporalmente; finalmente la molécula puede reemitir la radiación infrarroja absorbida; en el caso de los gases invernadero, esta radiación regresa a la tierra generando calor (Mauri *et al*., 2011; Khan *et al*., 2018).

13.4.2.1 Metano

La molécula de metano tiene una estructura tetraédrica con cuatro enlaces simples entre el carbono y el hidrógeno, por lo que es más fácil que estos enlaces vibren en comparación con los dobles enlaces de la molécula de CO_2. Debido a ello, hay muchas combinaciones posibles de movimientos en los enlaces, resultando en nueve modos de vibración posibles, aunque solamente en dos de ellos se absorbe en el infrarrojo (Figura 13.1), pero la cantidad de energía infrarroja absorbida y emitida por el metano es mayor que la del CO_2.

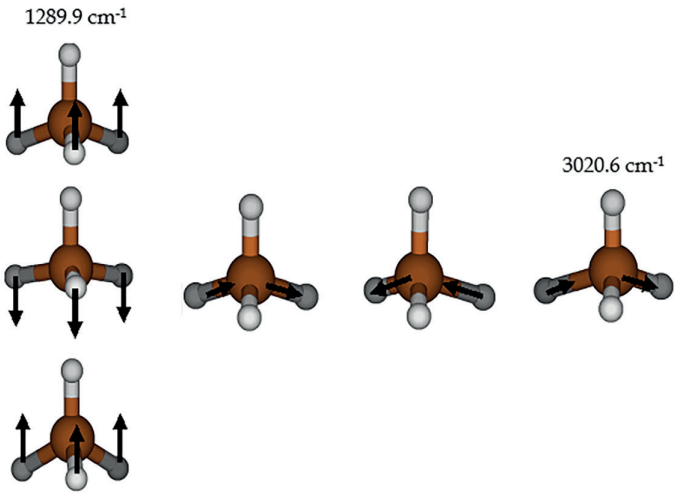


Figura 13.1 *Modos de vibración de la molécula del metano que absorben radiación infrarroja.*

13.4.2.2 Óxido nitroso

El N_2O es una molécula plana; las longitudes de los enlaces N=N y N=O son menores a los esperados debido a la forma resonante en que el enlace entre los átomos de nitrógeno es triple; en tanto que la razón de la corta distancia de enlace entre el N=O se ha atribuido a la contracción de los orbitales en el átomo central de nitrógeno, con una carga formal positiva en sus dos formas de resonancia (Figura 13.2), lo cual también explica su momento dipolar relativamente bajo (Trogler *et al*., 1999).

Figura 13.2 *Formas resonantes del N_2O.*

El espectro de infrarrojo del N_2O muestra tres fuertes absorciones (Figura 13.3): una correspondiente al estiramiento asimétrico de N-N que es el que contribuye más para atrapar calor, la segunda es por el estiramiento simétrico de N-N que contribuye menos a la absorción de radiación infrarroja y la tercera se debe al estiramiento de N-O, que prácticamente no contribuye al calentamiento (Trogler *et al*., 1999).

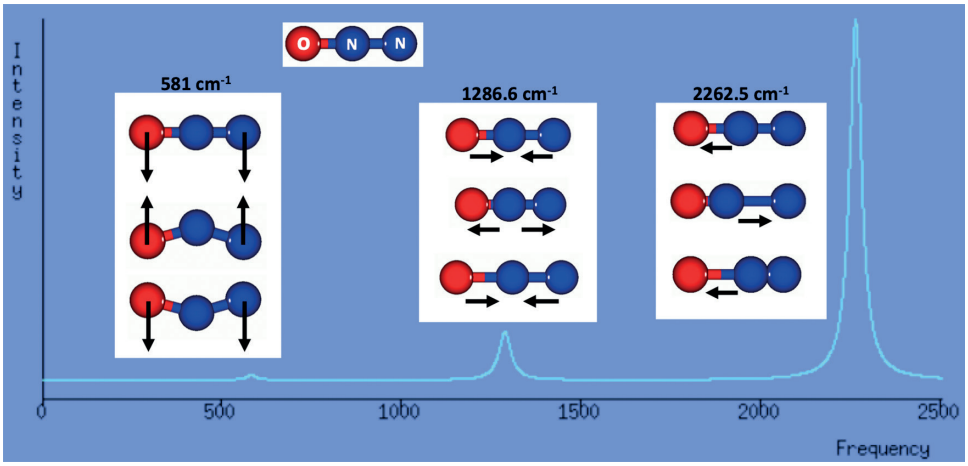


Figura 13.3 *Modos de vibración de la molécula de óxido nitroso que absorben radiación infrarroja.*

Debido a su estructura molecular y a los modos de vibración de sus enlaces, los HCFC y los HFC tienen altos PCG, ya que los átomos de flúor son los elementos más electronegativos y forman enlaces covalentes fuertes, lo que facilita a las moléculas modos de vibración y rotación que son eficaces para capturar y reemitir radiación infrarroja; asimismo, sus bandas de absorción coinciden con las longitudes de onda que emite la superficie terrestre (Cabral *et al*., 2001; Mc Daniel, 1991).

13.4.2.3 Carbono negro

Como se mencionó anteriormente, este contaminante se forma en condiciones pirolíticas durante la combustión incompleta de la materia orgánica, formando partículas muy pequeñas de carbono elemental que impactan negativamente tanto la calidad del aire como el clima, ya que tiene una fuerza radiativa positiva que contribuye a calentar el planeta (Bond *et al*., 2013). La magnitud de la fuerza radiativa del carbono negro no es homogénea porque depende de la mezcla de las partículas con otros aerosoles, de su amplia sección transversal y de su envejecimiento en la atmósfera; este envejecimiento del carbono negro pasa por dos etapas; en la primera se transforma de una morfología fractal a una esférica, en la cual la absorción varía muy poco y en la segunda las partículas crecen de forma compacta y aumenta la absorción (Peng *et al*., 2016). El carbono negro, de forma similar a un cuerpo negro, absorbe la luz solar y no la refleja ni la transmite, lo cual genera calor en la atmósfera (Negi *et al*., 2021). El carbono negro es un contaminante de vida corta que permanece en la atmósfera solamente de 4 a 12 días, aunque puede transportarse a grandes distancias. Actualmente, varias investigaciones

lo colocan como el segundo compuesto contribuyente al cambio climático después del CO_2, por lo que su control contribuiría en gran manera a enfrentar el calentamiento global (Harmsen *et al*., 2020; Ortúzar *et al*., 2016).

13.5 Fuentes de los contaminantes climáticos

La Tabla 13.5 presenta las principales fuentes de emisión de los contaminantes climáticos distintos al CO_2 (Howarth, 2019; Forte *et al*., 2017; Van Amstel, 2012; Stams y Plugge, 2010; Ehhalt *et al*., 2001).

Tabla 13.5 *Fuentes de emisión de los contaminantes climáticos.*

Gas	Fuente	
	Antropogénica	Natural
Metano	Las actividades agrícolas, como el cultivo de arroz y la ganadería son las principales fuentes de emisión del metano. El tratamiento biológico de aguas residuales, las emanaciones de los rellenos sanitarios, el manejo del estiércol, la industria petroquímica, el uso de gas natural y la quema de biomasa también contribuyen a la emisión del CH_4. Finalmente, la fracturación hidráulica o "fracking" para obtener gas natural del subsuelo.	Los humedales emiten entre el 35 y 40% del metano en el mundo por la descomposición anaeróbica en la degradación de materia orgánica. La actividad de las termitas, los hidratos de metano contribuyen con el 8% en las fuentes naturales de CH_4.
Óxido nitroso	El uso de los fertilizantes sintéticos en la agricultura es la principal fuente de N_2O. La quema de combustibles fósiles emite N_2O en procesos de alta temperatura como los motores de vehículos y las industrias de producción de ácido nítrico y adípico (10-15%). El N_2O se usa como anestésico. Los rellenos sanitarios y el tratamiento de aguas residuales emiten pequeñas cantidades.	Los procesos microbianos en el suelo y humedales de nitrificación y desnitrificación. En menor proporción se generan por la digestión del ganado, el manejo de estiércol y en procesos biológicos en ecosistemas marinos
CFCs	Los perfluorocarbonos son compuestos utilizados en la industria electrónica, principalmente en la producción de circuitos integrados, las celdas fotovoltaicas y las pantallas planas TFT.	Estos compuestos son sintéticos y no se emiten en la naturaleza

Gas	Fuente	
	Antropogénica	Natural
HFCs	Los hidrofluorocarbonos son gases que han sustituido a los cloroflurocarbonos que son sustancias agotadoras del ozono estratosférico. Aunque los HFCs tienen potenciales mucho menores a los de los CFCs, también tienen un PCG relativamente alto en comparación de los otros gases invernadero. Se utilizan principalmente en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado, como propelentes, como espumantes, protección contra incendios y disolventes	Estos compuestos son sintéticos y no se emiten en la naturaleza
SF_6	Este compuesto tiene una elevada constante dieléctrica, por lo que se utiliza como gas aislante en equipos para distribución de energía eléctrica. Tiene una alta densidad y no sube a las capas altas de la atmósfera, aunque su vida media es alta.	Estos compuestos son sintéticos y no se emiten en la naturaleza
Carbono negro	Sus emisiones provienen de la combustión incompleta de carbón, diésel, leña y biomasa, por lo que el transporte pesado, la industria, la petroquímica, la minería de carbón y las quemas agrícolas.	Incendios forestales

En el año 2019, el IPCC reportó una emisión global total de GEI de 59±6.6 Gt de CO_2eq, con una contribución del 25% de los GEI-no-CO_2, la mayor aportación fue de CH_4 seguida del N_2O y los gases fluorados (Figura 13.4a); las emisiones de estos gases se incrementaron en total un 30% en 29 años, aunque el CH_4 y el N_2O solo se incrementaron en 26% y los gases fluorados en un 73% (Figura 13.4b) (Dhakal *et al*., 2022). Las emisiones de carbono negro en el mundo se han incrementado de 3.9 a 5.9 millones de toneladas en el mundo de 1970 a 2019 (O´Rourke *et al*., 2021).

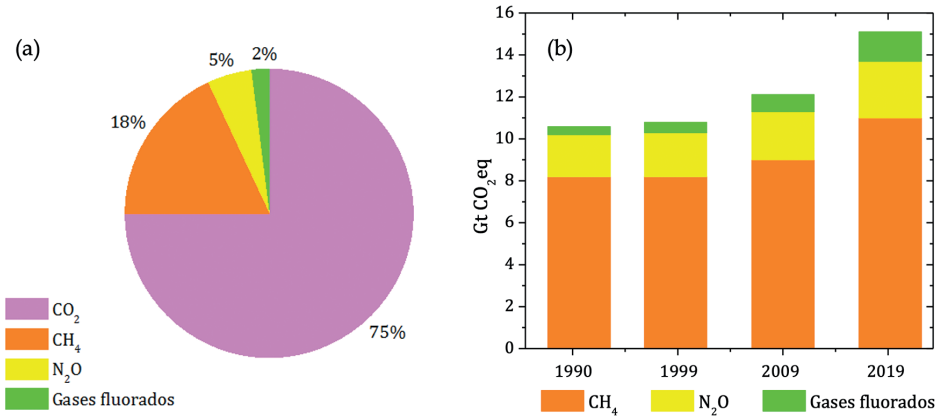


Figura 13.4a *Emisiones globales antropogénicas de GEI y* **13.4b** *emisiones de GEI-no-CO_2 (Dhakal et al., 2022).*

En México, las fuentes de emisión del CH_4 y del N_2O reportada en el Inventario Nacional de compuestos Invernadero de 2019 se muestran en la Figura 13.5, donde se aprecia que la fuente principal de ambos gases se debe a actividades de agricultura y ganadería. En 2019, las emisiones totales de GEI fueron de 534,688.6 toneladas de CO_2eq, con una contribución del 55% de CO_2, 32.8% de CH_4, 7.7% de N_2O, 4% de HFC y el resto de SF_6 y NF_3.

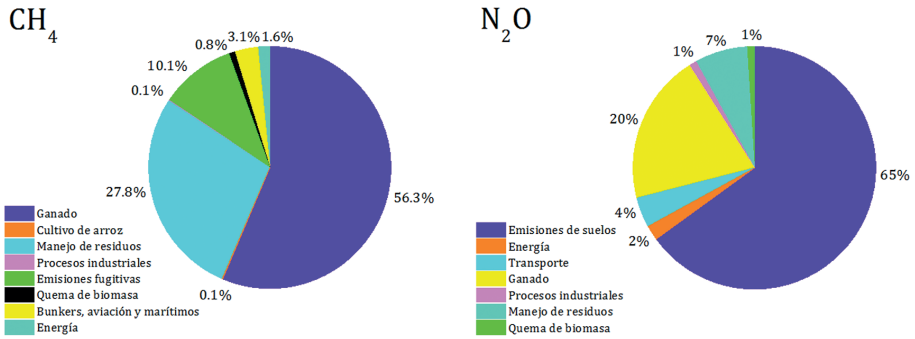


Figura 13.5 *Principales fuentes de emisión de metano y óxido nitroso (SEMARNAT, 2019).*

La Figura 13.6 muestra las tendencias de los últimos años de los gases de efecto invernadero en México. En esta figura se aprecia una ligera tendencia a la baja desde 2016 en las emisiones de CO_2, en tanto que las emisiones de CH_4 y N_2O se han mantenido casi constantes desde el año 2010. En cuanto a los hidroclorofluorocarbonos se aprecia un incremento constante desde el año 2000, habiéndose incrementado las concentraciones diez veces; esto puede deberse a que estos compuestos ya han substituido prácticamente por completo a los cloroflurocarbonos, debido a los compromisos con el protocolo de Montreal; los HFC más utilizados son el HFC-404a y el HFC-134a que contribuyen con el 38 y 36% del total de HFC, respectivamente, ya que se utilizan para refrigeración y aire acondicionado. Por el contrario, los perfluorocarbonos han disminuido más de 20 veces en las últimas dos décadas, correspondiendo el 86% de las emisiones al CF_4 que se utiliza en los procesos de manufactura de las celdas fotovoltaicas y en los de circuitos integrados, el C_2F_6 contribuye con el 10% de los PFC y se utiliza también en la manufactura de circuitos integrados. Sin embargo, el uso del SF_6 ha ido en aumento, como lo muestran sus emisiones que han aumentado más de 10 veces, por su uso en la industria electrónica; esto es preocupante porque el SF_6 tiene un potencial de calentamiento de 13,500. Se ha estimado que la contribución a la fuerza radiativa de los HFCs y SF_6 podría ser muy significativa a futuro si no se toman medidas de reducción efectivas (Dhakal *et al*., 2022).

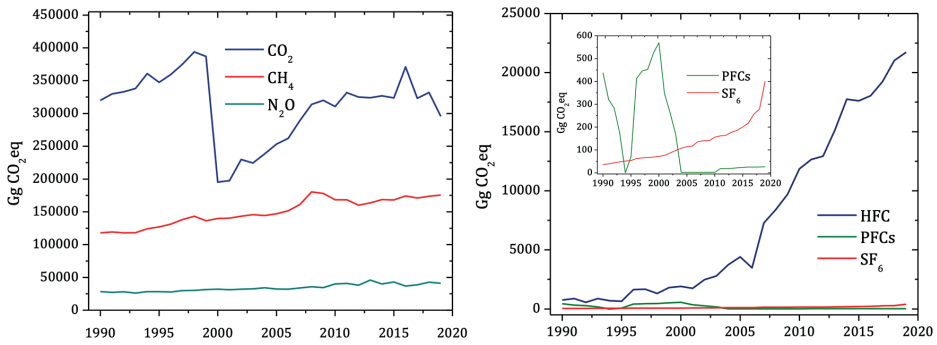


Figura 13.6 *Emisiones de gases invernadero en México (adaptado de INECC, 2021).*

La Figura 13.7 muestra la contribución global de las distintas fuentes de emisión de carbono negro a la atmósfera en el año 2019, donde se aprecia que el 53.1% corresponde a las emisiones por uso y generación de energía residencial, comercial e industrial.

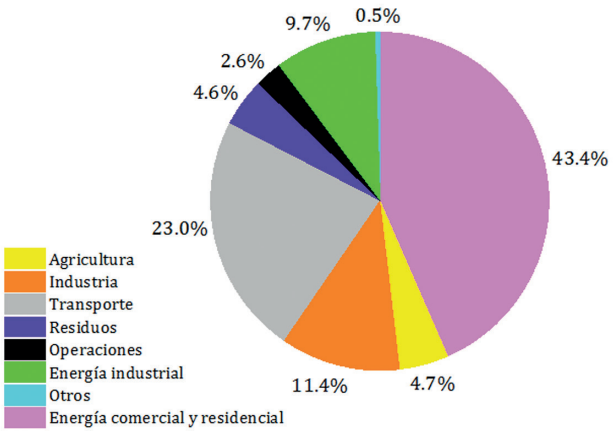


Figura 13.7 *Fuentes de emisión de carbono negro a nivel global (Zenodo data, 2021).*

13.6 Daños al medio ambiente

La principal afectación de los contaminantes climáticos, es sin duda su contribución al cambio climático que se ha discutido, sin embargo, otros efectos negativos en el medio ambiente se relacionan principalmente con el agotamiento de la capa de ozono; el N_2O, al llegar a la estratósfera reacciona con las moléculas de ozono, contribuyendo en parte a su abatimiento (Figura 13.8a), aunque es mínimo en comparación con el de los CFC y HCFC (Johnston, 1971).

Como se ha mencionado, actualmente el consumo de clorofluorocarbonos está prohibido y el de hidroclorofluorocarbonos es pequeño; pero existen muchos pasivos de estas moléculas en refrigeradores y sistemas de aire acondicionado que los contienen, por lo que este tipo de moléculas siguen llegando a la estratósfera, se rompen por la fuerte radiación UV produciendo radicales Cl• que reaccionan con el ozono troposférico; cabe destacar, que un solo radical cloro es capaz de destruir hasta 1,000 moléculas de ozono por la serie de reacciones fotoquímicas que se llevan a cabo, donde el radical cloro puede regenerarse muchas veces, como se muestra en la Figura 13.8b para el Refigerante-22 que corresponde a la molécula del clorodifluorometano (Molina y Rowland, 1974; Mugica, 2020).

(a)
$$N_2O + O\bullet \rightarrow 2NO$$
$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$
$$NO_2 + O\bullet \rightarrow NO + O_2$$
$$\overline{O_3 + O\bullet \rightarrow 2O_2}$$

(b)
$$HCF_2Cl + h\nu \rightarrow Cl\bullet + HCF_2$$
$$Cl\bullet + O_3 \rightarrow ClO\bullet + O_2$$
$$ClO\bullet + O\bullet \rightarrow Cl\bullet + O_2$$
$$\overline{O_3 + O\bullet \rightarrow 2O_2}$$

Figura 13.8 *Destrucción de la capa de ozono por N_2O y HCF_2Cl (R22).*

El carbono negro ha alterado el balance energético de la tierra y tiene repercusiones sobre la cantidad de luz solar que llega a la superficie del planeta; al depositarse en la nieve o en el hielo disminuye su albedo o reflectividad por lo que absorben más calor acelerando su fusión, lo que ha contribuido al retroceso de los glaciares y al deshielo del permafrost principalmente en las regiones polares (Negi y Pandey, 2021; Bond *et al*., 2013). Se ha reportado que las concentraciones de este contaminante son de dos a tres veces más altas en latitudes medias que en latitudes polares porque se acumula en las temporadas de deshielo (Kang *et al*., 2020).

13.7 Daños a la salud

Ni el metano ni el óxido nitroso en la atmósfera constituyen un peligro para la salud, puesto que no generan ningún efecto tóxico, excepto por una alta concentración que desplace el oxígeno y pudiera generar asfixia, como en el caso de emisiones en minas o pozos profundos, o por un mal manejo o accidente en el transporte o uso del metano que es explosivo (Adgate *et al*., 2014; Haines y Patz, 2004). No obstante, el CH_4 contribuye al incremento global de las concentraciones del O_3 troposférico, que tiene efectos adversos en la salud humana, como se trató en el capítulo correspondiente.

Es difícil diferenciar los daños a la salud producidos por la exposición al carbono negro contenido en el hollín de las partículas atmosféricas, puesto que el carbono negro adsorbe compuestos tóxicos contenidos en el carbono orgánico de las partículas, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos que en general se asocian con afecciones respiratorias, agravan las condiciones preexistentes como el asma y enfisema, e incluso algunos tienen propiedades cancerígenas y mutagénicas; por su pequeño tamaño el carbono negro y sus especies adsorbidas llegan al torrente sanguíneo aumentando el riesgo de enfermedades cardiovasculares como infartos y embolias, y el hollín puede generar impactos en la visión y daños en la piel (Ali *et al*., 2021; Kumar *et al*., 2015, Janssen *et al*., 2012).

Los efectos producidos por la inhalación de altas concentraciones de HCFC se relacionan con somnolencia y aturdimiento, e incluso se ha mostrado que el HCFC-123, usado en la extinción de incendios, puede producir hepatitis en trabajadores expuestos; el contacto con el líquido a presión puede provocar congelación en la piel y enrojecimiento y dolor en los ojos; sin embargo, los niveles atmosféricos de HCFC son tan bajos que no producen los efectos mencionados o los efectos crónicos (Grillet *et al*., 2019; Kim *et al*., 2018; Dekant, 1996).

Debido al cambio climático, al aumento de temperatura y a las variaciones en los patrones de humedad de las distintas regiones del planeta, ha habido modificaciones en la distribución y la intensidad de enfermedades transmitidas por vectores, debido a que, con el cambio del clima, estos vectores que en años anteriores solamente aparecían en zonas tropicales, se han desplazado a latitudes más altas debido al incremento de la temperatura (Grillet *et al*., 2019). Asimismo, el incremento en lluvias y zonas inundadas asociadas al cambio climático generan condiciones favorables para la proliferación de mosquitos e insectos transmisores como: la malaria transmitida por algunas espe-

cies del mosquito *Anopheles*; el dengue transmitido por los mosquitos *Aedes aegypti y Aedes albopictus*; el zica y el chicunguya transmitidos por algunas especies de mosquito *Aedes*; la fiebre del Nilo Occidental transmitida por mosquitos de especies *Culex* y *Aedes* y la fiebre amarilla transmitida por mosquitos de especies *Aedes* y *Haemagogus* (Campos *et al*., 2019; Wen *et al*., 2012).

El incremento de las olas de calor asociadas al cambio climático propicia enfermedades gastrointestinales y deshidratación, mientras que el aumento en incendios forestales favorece enfermedades respiratorias y cardiovascualares, principalmente en poblaciones vulnerables. De forma indirecta, las afectaciones en la producción de alimentos contribuyen a la migración y a la malnutrición de algunas comunidades (Paavola, 2017; Lake *et al*., 2012). Finalmente, desórdenes mentales como el estrés, la depresión y ansiedad se han intensificado por los eventos climáticos extremos (Charlson *et al*., 2021; Padhy *et al*., 2015), de hecho se ha sugerido que el cambio climático representa la mayor amenaza a la salud mental en el siglo XXI (Costello *et al*., 2009).

13.8 Mitigación de los contaminantes climáticos de vida corta

Debido a que los CCVC tienen una relativa baja permanencia en la atmósfera, si se reducen sus emisiones puede conseguirse una mitigación más rápida del cambio climático y un decrecimiento inmediato de la tendencia del calentamiento global, necesario para cumplir los objetivos del acuerdo de París (Heines *et al*., 2017; iNDC, 2015).

Algunas de las políticas de reducción de los contaminantes de vida corta son (Harmsen *et al*., 2020; Sarofin *et al*., 2017; Ortúzar *et al*., 2016; West *et al*., 2006):

Metano

- La medida de mitigación más importante es la captura y reutilización del metano como fuente de energía de los rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales.
- La disminución de metano contribuye a disminuir la formación de ozono y el incremento en la producción de los cultivos.
- La mejora de la dieta del ganado y manejo del estiércol.
- Recuperación de metano en la extracción de carbón y petróleo.

Carbono negro

- La reducción y eventual eliminación de la quema de residuos sólidos municipales y la prevención de incendios forestales coadyuva a una reducción importante tanto de las emisiones de carbono negro como de otros gases contaminantes.
- Eliminar el consumo residencial y comercial del uso de carbón y biomasa en la calefacción y preparación de alimentos.
- Eliminar el uso de transporte que emite grandes cantidades de hollín e incluir el uso de equipos de control como filtros en los motores a diésel.

- Modernizar los hornos de coque industriales, mejorar la eficiencia de equipos de control de partículas, azufre y NOx en plantas de energía y
- Sustituir los hornos artesanales de ladrillos por hornos más eficientes y limpios.
- Uso de equipo de labranza y cultivo para evitar las quemas agrícolas, promover el corte en verde de la caña de azúcar para eliminar la quema pre-cosecha. Utilizar los residuos agrícolas en la industria de producción de papel, que además ayudará a evitar la deforestación.

Las medidas anteriores, tendrán como cobeneficio una mejora en la calidad del aire, evitando millones de enfermedades respiratorias y cardiovasculares y muertes prematuras.

13.9 Detección de los contaminantes climáticos de vida corta

El metano y el óxido nitroso pueden medirse por cromatografía de gases con detector de conductividad térmica; el CH_4 puede medirse también con detector de ionización de flama y el N_2O con detector de captura de electrones; también ambos pueden cuantificarse por espectroscopía de infrarrojo (Liu *et al*., 2018; Rapson y Dacres, 2014). Actualmente, para detectar fugas de metano de manera fácil y rápida se utilizan distintos tipos de sensores que tienen alta sensibilidad, amplio rango de medición y respuesta lineal; entre ellos se encuentran los ópticos, los semiconductores de óxidos metálicos, los calorimétricos, los catalíticos o termométricos y los de conductividad térmica (Kwasny y Bombalzka, 2023). La medición de HFC se realiza con cromatografía de gases acoplado a un detector de captura de electrones que es muy sensible a la determinación de halógenos o con detector de masas.

Dependiendo de la técnica experimental utilizada para los análisis de carbono, se define la especie medida como carbono elemental (CE) o como carbono negro (CN); aunque de acuerdo a la OMS, se utilizan ambos términos de manera indistinta para referirse a su contribución al calentamiento global. Sin embargo, al ser distintos los métodos experimentales no existe una coincidencia exacta entre el carbono negro y carbono elemental. Cuando se utiliza un método termo óptico se cuantifica al carbono negro por su absorción de luz a 880 nm, mientras que cuando se utiliza un método termoquímico, se cuantifica al carbono elemental, a través de un análisis que involucra elevar la temperatura entre 750 y 800 °C para oxidar todo el CE a CO_2 y posteriormente reducirlo a CH_4 que se cuantifica (Janssen *et al*., 2012). Continuamente se realizan investigaciones para estandarizar ambos métodos y encontrar sus equivalencias.

Actualmente, desde los satélites de la NASA como el Terra y el Aqua y el Sentinel-5P de la Agencia Espacial Europea, se monitorean varios contaminantes climáticos a través de equipos como el denominado "Tropospheric Monitoring Instrument" (TROPOMI), basado en la absorción diferencial de luz en diferentes longitudes de onda que permite registrar fluctuaciones de las distintas especies químicas a nivel global.

13.10 Niveles de los contaminantes climáticos en México y el mundo

En el año 2019, las concentraciones globales de CH_4 alcanzaron 1866 ppb y las de N_2O 332 ppb y desde el año 1750 han aumentado 156% y 23%, respectivamente, mientras que existe un alto nivel de confianza de que los niveles de CO_2 son los más altos en los últimos dos millones de años (IPCC, 2023; Dunse *et al*., 2018). En 2017, el HFC-134a reportó 89 ppt, el HFC-23, 29 ppt, el HFC-125, 22 ppt, el HFC-143a, 20 ppt, el HFC-32, 12 ppt, el CF_4 83 ppt y el SF_6 9 ppt. En el caso de los CFC, las emisiones han decrecido por los reglamentos del Protocolo de Montreal y sus enmiendas; pero los HFC-23, HFC-152a, HFC-134a, CF_4 y SF_6 se están incrementando por su uso en la industria entre 0.1 y 0.2 ppt por año (IPCC, 2023; Dunse *et al*., 2018).

13.11 Reflexiones y conclusiones

El conocimiento de la química y del origen de los distintos compuestos responsables del incremento en el efecto invernadero, permite comprender: a) los mecanismos por los cuales pueden generar daño a la salud y/o al medio ambiente y eventualmente evitarlos, b) los principios que permiten su cuantificación a través de métodos fisicoquímicos y c) la forma en que se pueden controlar a través de tecnologías alternativas en las industrias y la generación de energía.

La medición sistemática de los niveles de concentración de los contaminantes climáticos es fundamental para que las distintas ciudades lleven a cabo la actualización constante de sus inventarios de emisión en cada país o región para diseñar medidas efectivas para la disminución de la emisión de contaminantes climáticos, lo cual también traerá co-beneficios en la recuperación de la capa de ozono, la calidad del aire y la salud de las poblaciones.

Asimismo, el estudio continuo del comportamiento en la atmósfera de estas especies coadyuva a tomar medidas de prevención y generar instituciones e infraestructura más resilientes ante los eventos climáticos extremos. Finalmente, las mediciones satelitales contribuyen a conocer en tiempo real las variaciones en las concentraciones de los contaminantes climáticos y vincularlas con eventos extremos y fenómenos de olas de calor, deshielo y derretimiento de glaciares, para proponer acciones a nivel global para enfrentar y disminuir estos efectos.

Referencias

1. Ali, M. U., Siyi, L., Yousaf, B., Abbas, Q., Hameed, R., Zheng, C., ... y Wong, M. H. (2021). Emission sources and full spectrum of health impacts of black carbon associated polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban environment: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *51*(9), 857-896.

2. Benhadid-Dib, S., y Benzaoui, A. (2012). Refrigerants and their environmental impact Substitution of hydro chlorofluorocarbon HCFC and HFC hydro fluorocarbon. Search for an adequate refrigerant. *Energy Procedia*, *18*, 807-816.
3. Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., ... y Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, *118*(11), 5380-5552.
4. Cabral, B. J. C., Guedes, R. C., Pai-Panandiker, R. S., y de Castro, C. A. N. (2001). Hydrogen bonding and the dipole moment of hydrofluorocarbons by density functional theory. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *3*(19), 4200-4207.
5. Campos Soldini, M. P., Safenraiter, M. E., Wagner, L. S. y Fernández, E. N. (2019). Monitoring of *Aedes aegypti Linneaus* (*Diptera: Culicidae*) in the urban radius of the city of Diamante. *Scientia interfluvius*. Ed. Universidad Autónoma entre Ríos.
6. Charlson, F., Ali, S., Benmarhnia, T., Pearl, M., Massazza, A., Augustinavicius, J., y Scott, J. G. (2021). Climate change and mental health: a scoping review. *International journal of environmental research and public health*, *18*(9), 4486.
7. Costello, A., Abbas, M., Allen, A., Ball, S., Bell, S., Bellamy, R., Friel, S., Groce, N., Johnson, A. y Kett, M. (2009). Managing the health effects of climate change: Lancet and University College London Institute for *Global Health Commission. Lancet*, 373, 1693–1733.
8. Dekant, W. (1996). Toxicology of chlorofluorocarbon replacements. *Environmental Health Perspectives*, *104*(suppl 1), 75-83.
9. Dervash M.A. y Wani A.A. (2022). *Climatic change alleviation for sustainable progression: Floristic prospects and arboreal avenues as a viable sequestration tool*. CRC Press. 382 páginas
10. Dhakal, S., J.C. Minx, F.L. Toth, A. Abdel-Aziz, M.J. Figueroa Meza, K. Hubacek, I.G.C. Jonckheere, Yong-Gun Kim, G.F. Nemet, S. Pachauri, X.C. Tan y T. Wiedmann (2022): Emissions Trends and Drivers. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report
11. Dunse, B. L., Derek, N., Fraser, P. J., Krummel, P. B., y Steele, L. P. (2019). Australian and global HFC, PFC, sulfur hexafluoride nitrogen trifluoride and sulfuryl fluoride emissions, Report prepared for Australian Government Department of the Environment and Energy.
12. Ehhalt D., Prather M., Dentener F., Derwent R., Dlugokencky E., *et al*.. (2001). Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. Climate change: the scientific basis, Intergovernmental Panel on Climate Change, Hal-03333922
13. Forte A., Fagnano M. y Fierro A. Potential role of compost and green manure amendment to mitigate soil GHGs emissions in Mediterranean drip irrigated maize production systems. *Journal of Environmental Management*, 192 (2017), pp. 68-78, 10.1016/j.jenvman.2017.01.037
14. iNDC 2015. Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030.: *Intended Nationally Detrmined Contribution*. Gobierno de la República, México.

15. Green, J., y Sadru D. (2007). Modern Analytical Chemistry. In *Chemistry*. 3rd ed. Melton, Vic.: IBID Press. 97-125, 299-304
16. Grillet, M. E., Hernández-Villena, J. V., Llewellyn, M. S., Paniz-Mondolfi, A. E., Tami, A., Vincenti-Gonzalez, M. F., ... y Alarcón-de Noya, B. (2019). Venezuela's humanitarian crisis, resurgence of vector-borne diseases, and implications for spillover in the region. *The Lancet Infectious Diseases*, *19*(5), e149-e161.
17. Haines, A., y Patz, J. A. (2004). Health effects of climate change. *Jama*, *291*(1), 99-103. doi:10.1001/jama.291.1.99
18. Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D. W., y Medina-Elizade, M. (2006). Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *103*(39), 14288-14293.
19. Harmsen, M. J., van Vuuren, D. P., van Den Berg, M., Hof, A. F., Hope, C., Krey, V., ... y Schaeffer, M. (2015). How well do integrated assessment models represent non-CO_2 radiative forcing?. *Climatic Change*, *133*, 565-582.
20. Harmsen, M. J., van Dorst, P., van Vuuren, D. P., van den Berg, M., Van Dingenen, R., y Klimont, Z. (2020). Co-benefits of black carbon mitigation for climate and air quality. *Climatic Change*, *163*, 1519-1538.
21. Howarth, R. W. (2019). Ideas and perspectives: is shale gas a major driver of recent increase in global atmospheric methane?. *Biogeosciences*, *16*(15), 3033-3046.
22. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). 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, and T. Waterfield Eds. 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.
23. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *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.
24. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
25. Imasu, R., Suga, A., y Matsuno, T. (1995). Radiative effects and halocarbon global warming potentials of replacement compounds for chlorofluorocarbons. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, *73*(6), 1123-1136.
26. INECC-SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021).Inventario Nacional de

Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) 1990-2019. Disponible en: https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei/resource/c47e8e11-3fb6-4a91-9cac-e00eea74184c

27. Janssen, N. A., Gerlofs-Nijland, M. E., Lanki, T., Salonen, R. O., Cassee, F., Hoek, G., ... y Krzyzanowski, M. (2012). *Health effects of black carbon*. World Health Organization. Regional Office for Europe.
28. Johnston, H. S. (1971). Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust, *Science*, 173, 517-522.
29. Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y., y Wang, H. (2020). A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere. *Earth-science reviews*, *210*, 103346
30. 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). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2
31. Kim, K. W., Park, H. D., Jang, K., y Ro, J. (2018). Exposure Assessment for Toxic Hepatitis Caused by HCFC-123. *Safety and Health at Work*, *9*(3), 356-359.
32. Kumar P., Kumar, S. y Joshi, L. (2015) Socioeconomic and environmental implications of agricultural residue burning, *Springer Briefs in Environmental Science*, p 13. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2014-5_2
33. Kwaśny, M., y Bombalska, A. (2023). Optical methods of methane detection. *Sensors*, *23*(5), 2834.
34. Lake, I. R., Hooper, L., Abdelhamid, A., Bentham, G., Boxall, A. B., Draper, A., ... y Waldron, K. W. (2012). Climate change and food security: health impacts in developed countries. *Environmental health perspectives*, *120*(11), 1520-1526.
35. Lelieveld, J., Gromov, S., Pozzer, A., y Taraborrelli, D. (2016). Global tropospheric hydroxyl distribution, budget and reactivity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 12477–12493, https://doi.org/10.5194/acp-16-12477-2016,
36. Liu, X., Yang, J., Ye, T., y Han, Z. (2018, February). Establishment of analysis method for methane detection by gas chromatography. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 113, p. 012023). IOP Publishing.
37. Long, C. M., Nascarella, M. A., y Valberg, P. A. (2013). Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions. *Environmental pollution*, *181*, 271-286.
38. Mauri A., Llobet M.J. y Herráez R. (2011). Laboratorio de Análisis Instrumental. Universidad de Valencia, España.
39. McConnell, J. S. 2012. Not So "Good Vibrations" Molecules and Climate Change.
40. McDaniel, A. H., Cantrell, C. A., Davidson, J. A., Shetter, R. E., y Calvert, J. G. (1991). The temperature dependent, infrared absorption cross-sections for the chlorofluorocarbons: CFC-11, CFC-12, CFC-13, CFC-14, CFC-22, CFC-113, CFC-114, and CFC-115. *Journal of Atmospheric Chemistry*, *12*, 211-227.
41. Mehmood, T., Hassan, M. A., Li, X., Ashraf, A., Rehman, S., Bilal, M., ... y Shakoor, A. (2022). Mechanism behind sources and sinks of major anthropogenic green-

house gases. *Climate Change Alleviation for Sustainable Progression; CRC Press: Boca Raton, FL, USA*, 114-150.
42. Molina, M. J. y F. S. Rowland, 1974: Stratospheric sink for chloroflouromethanes: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone. *Nature*, 249, 810.
43. Mugica Álvarez Violeta. Ozono, héroe y villano ambiental. *Boletín de la Sociedad Química de México*. 2020.
44. Myhre G., Shindell D., y Pongratz J. (2014). Anthropogenic and natural radiative forcing, in Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ed. T. F. Stocker *et al*., pp. 659–740, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., and New York.
45. Myhre M.G, Highwood E. J., y Shine K. P. (2016). Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing, *Geophysics Research Letters*, 43, 12,614–12,623, doi:10.1002/2016GL071930.
46. Negi, P. S., y Pandey, C. P. (2021). Black carbon pollutants in pristine Himalayan ecosystem: a pilot study along Gangotri Glacier Valley. *Environmental Monitoring and Assessment*, *193*, 1-12.
47. Ortúzar, F., y Tornel, C. (2016). Controlando los contaminantes climáticos de vida corta: una oportunidad para mejora la calidad del aire y mitigar el cambio climático: el caso de Brasil, Chile y México; AIDA.
48. O'Rourke, Patrick R; Smith, Steven J; Mott, Andrea; Ahsan, Hamza; McDuffie, Erin E; Crippa, Monica; Klimont, Zbigniew; McDonald, Brian; Wang, Shuxiao; Nicholson, Matthew B; Feng, Leyang; Hoesly, y Rachel M. (2021). CEDS v_2021_04_21. Release emission data Zenodo, doi:10.5281/ZENODO.4741285
49. Paavola, J. (2017). Health impacts of climate change and health and social inequalities in the UK. *Environmental Health*, *16*(1), 61-68.
50. Padhy, S. K., Sarkar, S., Panigrahi, M., y Paul, S. (2015). Mental health effects of climate change. *Indian journal of occupational and environmental medicine*, *19*(1), 3.
51. Peng, J., Hu, M., Guo, S., Du, Z., Zheng, J., Shang, D., ... y Zhang, R. (2016). Markedly enhanced absorption and direct radiative forcing of black carbon under polluted urban environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(16), 4266-4271.
52. Polonara, F., Kuijpers, L., y Peixoto, R. (2017). Potential impacts of the Montreal Protocol Kigali Amendment to the choice of refrigerant alternatives. *International Journal of Heat Technology*, *35*(1), 1-8.
53. Premakumara, D. G. J., Menikpura, S. N. M., Singh, R. K., Hengesbaugh, M., Magalang, A. A., Ildefonso, E. T., ... y Silva, L. C. (2018). Reduction of greenhouse gases (GHGs) and short-lived climate pollutants (SLCPs) from municipal solid waste management (MSWM) in the Philippines: Rapid review and assessment. *Waste Management*, *80*, 397-405.
54. Rapson, T. D. y Dacres, H. (2014). Analytical techniques for measuring nitrous oxide. *Trends in Analytical Chemistry*, *54*, 65-74.
55. Sarofim, M. C., Waldhoff, S. T., y Anenberg, S. C. (2017). Valuing the ozone-related health benefits of methane emission controls. *Environmental and Resource Economics*, *66*, 45-63.

56. Shurpali, N., Agarwal, A. K., y Srivastava, V. K. (2019). Introduction to greenhouse gas emissions. *Greenhouse Gas Emissions: Challenges, Technologies and Solutions*, 1-5.
57. Solomon, K. R., Velders, G. J., Wilson, S. R., Madronich, S., Longstreth, J., Aucamp, P. J., y Bornman, J. F. (2016). Sources, fates, toxicity, and risks of trifluoroacetic acid and its salts: Relevance to substances regulated under the Montreal and Kyoto Protocols. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, *19*(7), 289-304.
58. Stams AJM, y Plugge CM. (2010). The microbiology of methanogenesis. In: Reay D, Smith P, Van Amstel A, Ed. *Methane and climate change*. London: Earthscan. p. 14–26.
59. Trogler, W. C. (1999). Physical properties and mechanisms of formation of nitrous oxide. *Coordination chemistry reviews*, *187*(1), 303-327.
60. Valipour, M., Bateni, S. M., y Jun, C. (2021). Global surface temperature: a new insight. *Climate*, *9*(5), 81.
61. Van Amstel, A. (2012). Methane. A review. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, *9*(sup1), 5-30.
62. Victor-Gallardo, L., Roccard, J., Campos, P., Malley, C. S., Lefevre, E. N., y Quiros-Tortos, J. (2022). Identifying cross-sectoral policy synergies for decarbonization: towards short-lived climate pollutant mitigation action in Costa Rica. *Journal of Cleaner Production*, *379*, 134781.
63. Watson, A. Y., y Valberg, P. A. (2001). Carbon black and soot: two different substances. *AIHAJ-American Industrial Hygiene Association*, *62*(2), 218-228.
64. West, J. J., Fiore, A. M., Horowitz, L. W., y Mauzerall, D. L. (2006). Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *103*(11), 3988-3993.
65. Wen, T. H., Lin, M. H., y Fang, C. T. (2012). Population movement and vector-borne disease transmission: differentiating spatial–temporal diffusion patterns of commuting and noncommuting dengue cases. *Annals of the Association of American Geographers*, *102*(5), 1026-1037.
66. Wild, M., Grieser, J., y Schär, C. (2008). Combined surface solar brightening and increasing greenhouse effect support recent intensification of the global land-based hydrological cycle. *Geophysical Research Letters*, *35*(17).
67. Zaelke, D. (2013). Primer on short-lived climate pollutants. *IGSD: Washington, DC, USA*.
68. Zheng, B., Chevallier, F., Yin, Y., Ciais, P., Fortems-Cheiney, A., Deeter, M. N., ... y Zhao, Y. (2019). Global atmospheric carbon monoxide budget 2000–2017 inferred from multi-species atmospheric inversions. *Earth System Science Data*, *11*(3), 1411-1436.