



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**DAÑO DE LOS CLOROFLUOROCARBUIROS EN LA
CAPA DE OZONO, ACCIONES GENERADAS POR
TRATADOS INTERNACIONALES Y RESULTADOS EN
MÉXICO**

TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO**

**P R E S E N T A
SAMUEL EMMANUEL RAMÍREZ AGUILAR**



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE	Profesora: IRMA CRUZ GAVILAN GARCÍA
VOCAL	Profesor: JUVENAL FLORES DE LA ROSA
SECRETARIO	Profesor: JUAN ARTURO MENDOZA NIETO
1er. SUPLENTE	Profesora: MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA
2do SUPLENTE	Profesor: ERIK BERISTAIN MONTIEL

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO 111 DEL POSGRADO, EDIFICIO B, FACULTAD DE QUÍMICA,
UNAM

ASESOR DE TEMA:

DR. JUAN ARTURO MENDOZA NIETO

SUSTENTANTE:

SAMUEL EMMANUEL RAMÍREZ AGUILAR

AGRADECIMIENTOS

A la **Facultad de Química** que, durante años fue mi primera casa donde sus salones, pasillos y laboratorios me brindaron conocimientos y experiencias, los cuales me encaminaron hasta este momento.

Al **Dr. Juan Arturo Mendoza Nieto** quien accedió y se desempeñó como mi asesor: apoyándome, siendo un mentor y orientándome para completar este proceso, brindándome un espacio en su equipo dentro del laboratorio 111 del posgrado de nuestra Facultad de Química, por lo cual estaré siempre agradecido.

Finalmente, y no menos importante, a todo el jurado asignado que aceptó ser parte de este proceso, brindando su tiempo y atención para aportar calidad a este trabajo.

DEDICATORIAS

A mi mamá, **Lilia Aguilar** quien siempre ha sido mi mayor ejemplo de vida inculcando que las cosas que tenemos son frutos de nuestro trabajo y que aun cuando la vida nos pone obstáculos, si lo deseamos podemos cumplir las metas.

A mis abuelitos, **Virginia y Manuel** que me cuidaron desde pequeño y son otros padres para mí, esperando algún día llegar a ser una pequeña parte de lo que ellos son. Enseñándome a disfrutar la vida y siendo feliz con la gente que nos rodea.

A esa persona que estuvo apoyándome siempre y creyó en mi aun cuando yo no lo hacía. Que siempre me apoyó en cada paso que daba, con su luz y sin darse cuenta me motivó a retomar este camino donde ahora me encuentro. Con gusto y a distancia te digo “logré terminar esto en lo que tanto me apoyaste”.

A **Luis Allende** quien ha sido durante años, como un hermano mayor y también, ejemplo a seguir en muchos aspectos de mi vida personal, académica y profesional.

También a **Brenda Lugo** y **Mauricio Ramírez** quienes son amigos a los cuales agradezco a la vida el encontrarme con ellos, que me enseñaron que se deben de hacer esfuerzos para llegar a las metas que nos imponemos, llegando a ser ejemplos en mi vida personal y profesional.

Tiempo y palabras faltarán para poder expresar todas las personas que han sido parte de mi vida y que formaron parte de la persona que soy ahora, simplemente tengo que decir **GRACIAS**.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. Objetivos	1
1. Objetivo principal	1
2. Objetivos particulares	1
II. Introducción	2
III. Contenido	3
1. Contaminación del ambiente y sus efectos	3
a. Agua	3
b. Tierra	7
c. Aire	10
2. La capa atmosférica	19
3. Gases contaminantes	21
a. Ozono	22
b. Fluorocarburos (FC)	26
c. Hidrofluorocarburos (HFC)	27
d. Hidroclorofluorocarburos (HCFC)	29
e. Halones	31
f. Clorofluorocarburos (CFC)	33
4. Clorofluorocarburos	35
a. Descubrimiento del daño ocasionado	37
b. Síntesis y usos	38
c. Efectos y daños a la capa de ozono	39
d. Reacciones involucradas	40
IV. Legislación y tratados internacionales	44
1. Historia	44

2.	Convenio de Viena	45
3.	Protocolo de Montreal (1987)	47
4.	Enmienda de Londres (1990)	50
5.	Enmienda de Copenhague (1992)	50
6.	Ajustes de Viena (1995)	50
7.	Enmienda de Montreal (1997)	51
8.	Enmienda de Beijing (1999)	51
9.	Enmienda de Kigali (2016)	51
V.	Resultados a nivel mundial.....	53
VI.	Resultados en México	60
VII.	Alternativas de gases refrigerantes	68
VIII.	Conclusiones.....	70
IX.	Referencias bibliográficas	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración III-1 Distribución de agua en el planeta Tierra.	4
Ilustración III-2 Ríos importantes de México.	6
Ilustración III-3 Ciclo de deposición de contaminantes a la tierra.	9
Ilustración III-4 Variación de concentración de ozono con promedio, así como el mínimo y máximo medido en partes por billón (ppb) medidos desde la estación de Pedregal.	12
Ilustración III-5 Variación de concentración de SO ₂ con promedio, así como el mínimo y máximo medido en partes por billón (ppb) medidos desde la estación de Tlalnepantla.	12
Ilustración III-6 Variación de concentración de CO con promedio, así como el mínimo y máximo medido en partes por billón (ppb) medidos desde la estación de Taxqueña.	13
Ilustración III-7 Cumplimiento de la NOM-020-SSA1-2014 estableciendo el límite de O ₃	15
Ilustración III-8 Cumplimiento de la NOM-022-SSA1-2019 estableciendo el límite de SO ₂	16
Ilustración III-9 Cumplimiento de la NOM-021-SSA1-1993 estableciendo el límite de CO.	17
Ilustración III-10 Muertes prematuras por alta contaminación atmosférica.	18
Ilustración III-11 Distribución de las capas atmosféricas.	20
Ilustración III-12. Gases contaminantes por revisar en el trabajo.	22
Ilustración III-13 Variación en la concentración de O ₃ a diferentes horas del día. Lecturas de diferentes años.	24
Ilustración III-14 Variación en la concentración de NO ₂ a diferentes horas del día. Lecturas de diferentes años.	25
Ilustración III-15 Observaciones satelitales sobre la Antártida en 1996.	39
Ilustración V-1 Cantidad en toneladas de liberación para diferentes CFC.	54
Ilustración V-2 Cantidad en toneladas de liberación para diferentes HCFC.	55
Ilustración V-3 Cantidad en toneladas de liberación para HFC-134a.	56

Ilustración V-4 Consumo de HFC a nivel mundial.	57
Ilustración V-5 Comparación de cantidad liberada a la atmósfera de diferentes compuestos.	58
Ilustración VI-1 Consumo total ponderado para todas las SAO reportado por el Consumo Ponderado Nacional de Sustancias Agotadoras de Ozono.....	63
Ilustración VI-2 Consumo ponderado de diferentes SAO reportado por el Consumo Ponderado Nacional de Sustancias Agotadoras de Ozono.	64
Ilustración VI-3 Comportamiento de la producción de SAO en México de 1986 a 2020.	66
Ilustración VI-4 Comportamiento de producción de HCFC desde el año 1989 hasta el 2020 en México.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla III-1 Listado de NOM encargadas de regular los gases de O ₃ , SO ₂ y CO con su respectiva fecha de publicación y límites establecidos para cada gas.	14
Tabla III-2. Ejemplos de algunos fluorocarburos.....	26
Tabla III-3 Ejemplos de algunos hidrofluorocarburos.....	28
Tabla III-4 Ejemplos de algunos hidroc fluorocarburos.....	30
Tabla III-5 Ejemplo de algunos compuestos halón.	32
Tabla III-6 Tiempo de vida atmosférica y PAO de algunos compuestos halogenados.....	34
Tabla III-7 Ejemplos de algunos clorofluorocarburos.....	36
Tabla IV-1 Sustancias de interés en el Convenio de Viena.	47
Tabla IV-2 Valor de PAO para diferentes fluorocarburos.....	48
Tabla VI-1 Consumo ponderado de sustancias agotadoras del ozono estratosférico en toneladas.	61
Tabla VII-1 Ejemplos de hidrofluoroolefinas. Nombre químico, estructura y clave de identificación.	69

SIGLAS Y ABREVIATURAS

AFEAS	.....	Aceptabilidad Ambiental de Fluorocarbonos Alternativos (por sus siglas en inglés)
AGAGE	.....	Experimento Avanzado de Gases Atmosféricos Globales (por sus siglas en inglés)
C ₄ H ₆	.....	Butadieno
C ₆ H ₆	.....	Benceno
CDMX	.....	Ciudad de México
CFC	.....	Clorofluorocarburos
CI	.....	Cardiopatías Isquémicas
CIO	.....	Monóxido de cloro
CO	.....	Monóxido de carbono
CO ₂	.....	Dióxido de carbono
COV	.....	Compuestos Orgánicos Volátiles
CPONSAO	...	Consumo Ponderado Nacional de Sustancias Agotadoras de Ozono
EPOC	.....	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
FC	.....	Fluorocarburos
FML	.....	Fondo Multilateral
GEI	.....	Gas de Efecto Invernadero
GTIS	.....	Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos
GWP	.....	Potencial de Calentamiento Global (por sus siglas en inglés)
H ₂ SO ₄	.....	Ácido sulfúrico
HCFC	.....	Hidroclorofluorocarburo
HFC	.....	Hidrofluorocarburo
HFO	.....	Hidrofluoroolefinas
HO ₂	.....	Radical hidroperoxilo
INEGI	.....	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
IRA	.....	Infecciones Respiratorias Agudas
MIT	.....	Massachusetts Institute of Technology
NO	.....	Monóxido de nitrógeno
NASA	.....	National Aeronautics and Space Administration

NEP.....Nubes Estratosféricas Polares
NO₂ Dióxido de nitrógeno
NOMNorma Oficial Mexicana
NO_x Óxidos de nitrógeno
O₃ Ozono
OMS Organización Mundial de la Salud
PAO Potencial de agotamiento de ozono
PMUNA Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
ppb partes por billón
ppt partes por trillón
SAO Sustancias Agotadoras de Ozono
SAP Panel de Evaluación Científica (por sus siglas en inglés)
SO₂ Dióxido de azufre
TEAP Panel de Evaluación Tecnológica y Económica (por sus siglas en inglés)
UNAM Universidad Nacional Autónoma de México
UV Ultravioleta
ZMVM Zona Metropolitana del Valle de México

I. Objetivos

1. Objetivo principal

Dar a conocer el estado actual de las emisiones de clorofluorocarburos (CFC), destacando los logros, metas, trabajo faltante o alternativas para su reducción total en la atmósfera, tomando en cuenta los datos proporcionados por instituciones públicas o gubernamentales a nivel mundial, y principalmente, establecer el avance que se ha tenido en México desde que se dio a conocer el daño generado a la capa de ozono.

2. Objetivos particulares

- 1) Informar a la comunidad científica sobre el efecto que tiene la liberación de CFC a nivel mundial, para motivar el desarrollo de nuevos procedimientos y técnicas.
- 2) Describir las principales características y problemáticas de los diferentes CFC utilizados en las últimas décadas, con el fin de motivar el desarrollo de nuevos compuestos aptos para sustituir completamente el uso de los CFC, sin generar el efecto negativo que éstos tienen.
- 3) Mostrar la evolución, en los últimos 30 años, de los diferentes tratados y enmiendas internacionales que han permitido la reducción de las emisiones de estos gases contaminantes a nivel mundial.
- 4) Establecer las diferentes alternativas que se tienen actualmente para el desarrollo de la siguiente generación de gases refrigerantes que sustituyan los hidrofluorocarburo (HFC), sin el impacto que tiene directamente como un gas de efecto invernadero (GEI).
- 5) Evidenciar el trabajo realizado en México para lograr la reducción de los niveles de los compuestos CFC.

II. Introducción

"Tal vez, el acuerdo internacional más exitoso hasta la fecha ha sido el Protocolo de Montreal".

El siguiente trabajo presenta información actualizada sobre el daño que se generó durante el siglo XIX por la liberación de gases refrigerantes, tales como: compuestos halón, clorofluorocarburos (CFC), hidrocloreofluorocarburos (HCFC) e hidrofluorocarburos (HFC).

Desde el inicio histórico, los gases refrigerantes fueron desarrollados a fin de cumplir una función específica; sin embargo, se descubrió que éstos tienen efectos secundarios; siendo el más importante, la degradación de la capa de ozono, impactando de forma directa en la calidad de vida conocida hoy en día.

Asimismo, se analizará el comportamiento químico que presentan los diferentes tipos de gases refrigerantes al ser liberados a la atmósfera, ya que su permanencia en las dos primeras capas de la atmósfera, aunado a la radiación solar, ocasionan diferentes reacciones químicas que provocan un efecto adverso en la composición y concentración de otros compuestos vitales para la vida en la Tierra.

Actualmente, se han desarrollado gases refrigerantes de segunda y tercera generación, los cuales, también tienen un impacto negativo; que si bien, no es tan grande como los compuestos de primera generación, siguen presentando efectos adversos. Lo anterior ha despertado el interés en generar nuevas tecnologías totalmente amigables con el medio ambiente.

Finalmente, se presentará el Convenio de Viena y el Protocolo de Montreal, a través de los cuales, a nivel mundial, se han tomado acciones inmediatas para reducir el impacto de los gases liberados a la atmósfera, estableciendo calendarios para detener completamente la liberación y producción de estos compuestos.

Los resultados de todas estas acciones tomadas a nivel global son públicas y vigiladas por instituciones internacionales, así como, de forma particular por cada país. En particular, los Estados Unidos Mexicanos (México) forma parte de los países comprometidos en esta labor, considerado como un país ejemplo en materia del trabajo realizado, las medidas y controles aplicados para mejorar la calidad de vida actual.

III. Contenido

1. Contaminación del ambiente y sus efectos

En términos generales, la contaminación es un factor determinante en el deterioro de la calidad de vida. Todas las actividades humanas y los fenómenos naturales van acompañados de emisiones de gases, vapores, polvos y partículas. Son estas partículas liberadas, cuando generan un impacto negativo en el ambiente, las responsables de lo que conocemos como “contaminación”, afectando principalmente a los recursos naturales básicos, como el agua, aire y tierra (Araujo Pulido, 2010).

a. Agua

El agua cubre más del 70% de la superficie del planeta. Se le encuentra en océanos, lagos, ríos, en el aire o en el suelo. Es la fuente y el sustento de la vida, contribuyendo a la regulación del clima del mundo. Posee propiedades únicas que la hacen esencial para la vida.

Los océanos dan cuenta de casi el 97.5 % del agua del planeta. Únicamente un 2.5% es agua dulce. De este porcentaje, los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares representan casi el 80% del agua dulce, el agua subterránea el 19% y el agua de superficie accesible rápidamente corresponde al 1% restante. Esta baja cantidad de agua de superficie, fácilmente accesible, se encuentra principalmente en lagos constituyendo un 52%, los humedales forman parte del 38%; mientras que, el 10% restante corresponde a ríos y el vapor atmosférico. (Cirelli, 2012)

Como se observa en la Ilustración III-1, la cantidad de agua de acceso rápido es extremadamente baja considerando el total de agua que se encuentra en nuestro planeta, representando únicamente el 0.025%. Por tal motivo el interés de generar una cultura de cuidado del agua ha aumentado de forma exponencial en las últimas décadas.

Distribución de agua en el planeta.

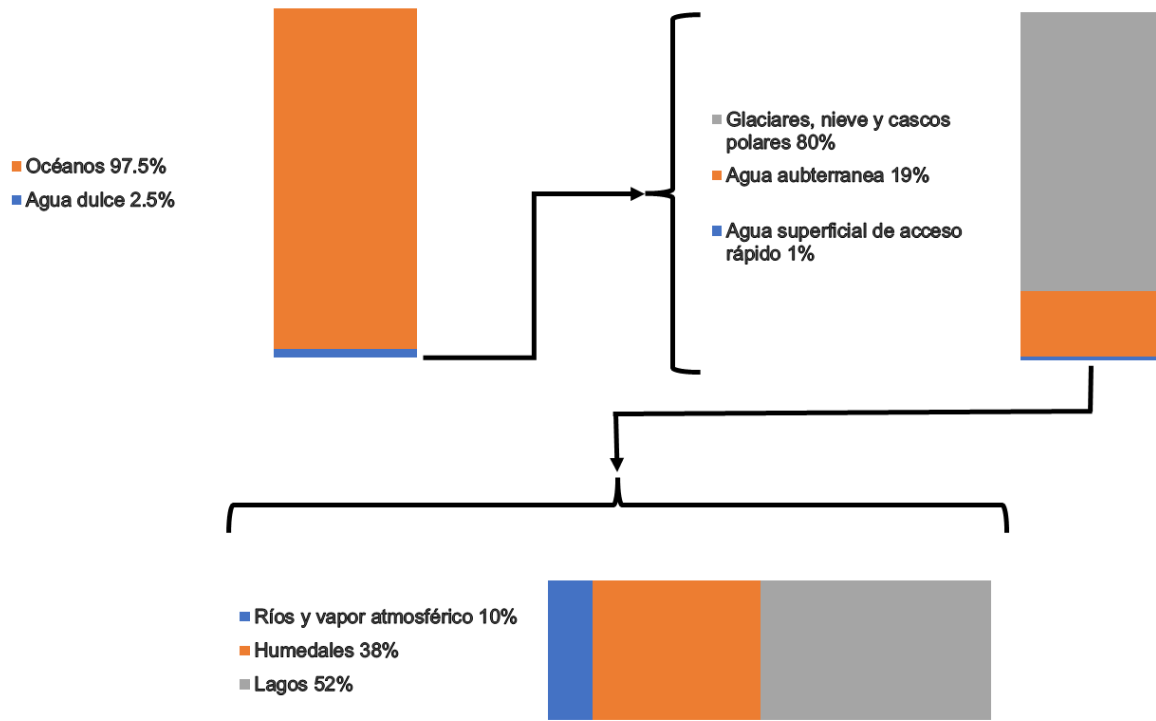


Ilustración III-1 Distribución de agua en el planeta Tierra.

Fuente: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86325090002>

La disponibilidad de agua es de suma importancia para la vida y el desenvolvimiento económico de cualquier región del mundo. Las dos terceras partes de los recursos hídricos se destinan al uso agrícola, con una demanda creciente para el turismo, usos urbanos e industriales, compitiendo por un acceso a un recurso cada vez menos disponible.

En particular, los productos farmacéuticos y cosméticos son elementos importantes dentro de la vida moderna y se emplean tanto en la medicina humana como veterinaria. Estas sustancias se incorporan a las aguas superficiales a través de los residuos cloacales, siendo una fuente directa de contaminantes del agua (Cirelli, 2012).

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) de México, la contaminación del agua es un proceso ecológico degenerativo, en el cual, al agua se incorporan microorganismos patógenos, sustancias químicas tóxicas, minerales en concentraciones variables y ocasionalmente radiactivas (INEGI, 2021).

Las principales causas o fuentes de contaminación, tanto para el agua dulce como la salada, son los vertederos incontrolados de las aguas residuales urbanas e industriales, muchas veces sin tratamiento; así como, las prácticas agrícolas deficientes (Cirelli, 2012).

La contaminación debida a procesos naturales como arrastre de hojarasca, partículas, o por el ingreso de gases atmosféricos transportados por la lluvia, es mínima en comparación con la contaminación que se genera por las actividades humanas (SRALA, 2019).

En específico, México cuenta con aproximadamente el 0.1% del total de agua dulce disponible a nivel mundial. Al 31 de diciembre de 2014, se tenían registrados un total de 653 acuíferos.¹ Los ríos y arroyos del país constituyen una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud. En la Ilustración III-2, se muestran los ríos más importantes en el territorio nacional. Entre estos, destacan 51 ríos principales por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial total del país. La superficie del territorio de México compuesta por humedales equivale a 10 millones de hectáreas (Comisión Nacional del Agua, 2015).

¹ Formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo.

Los principales efectos que produce el agua contaminada en el ambiente son: contaminación microbiológica del agua con la transmisión hídrica de enfermedades, pérdida de los ecosistemas acuáticos, riesgo de infecciones crónicas en el hombre asociadas a la contaminación química, pérdida de la capacidad productiva en suelos regados a causa de los procesos de salinización, pérdida de la reserva de proteínas de los peces, pérdida de suelos por erosión, entre otros.

b. Tierra

El término “contaminación del suelo” frecuentemente ha sido usado como sinónimo de la polución del suelo. El Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos (GTIS) bajo la Alianza Mundial por el Suelo (AMS) ha formalizado la definición de ambos términos. La contaminación del suelo ocurre cuando la concentración de un químico o sustancia es más alta, de la que ocurriría naturalmente, sin que necesariamente se cause un daño. Por otro lado, se refiere a la presencia de un compuesto o sustancia ajena al sitio y/o presente en concentraciones más altas de lo normal, que tiene efectos adversos sobre cualquier organismo al que no está destinado (Rodríguez Eugenio et al., 2019).

Por tanto, la contaminación es resultado de actividades planeadas, así como, de actividades involuntarias. Estas actividades pueden incluir la introducción directa de contaminantes en el suelo; además de procesos ambientales complejos que pueden ocasionar una contaminación indirecta del suelo a través del agua o de la deposición atmosférica.

Cuando la contaminación del suelo es directamente causada por actividades que se encuentran dentro de un área determinada y la fuente de contaminación es identificada, se considera como contaminación de origen puntual y principalmente se encuentra en las zonas urbanas. Este tipo de contaminación procede principalmente de actividades humanas, de las cuales destacan: el asentamiento de industrias, vertederos de residuos no controlados y en el caso de la minería, cuando la normatividad que regula la acción es deficiente y no considera los elementos en cantidad de trazas que son liberados. La contaminación puntual causada por actividades industriales representa riesgos para la salud humana debido a que se

liberan sustancias que llegan a ser tóxicas al estar en contacto con el organismo humano (Rodríguez Eugenio et al., 2019).

Por otro lado, cuando comienza a extenderse por áreas superficiales más grandes y la determinación de la fuente es difícilmente rastreable, o cuando no es una fuente única, se considera como contaminación difusa. Lo anterior puede ocurrir por el arrastre generado por diferentes medios naturales como son aire, agua y la misma tierra. Por esta razón, es difícil de determinar, o medir la cobertura del impacto en el área en donde está presente. La extensión de los contaminantes puede darse por actividades humanas en conjunto con fenómenos naturales, como lo son: corrientes río abajo de aguas contaminadas, inundaciones, deposiciones atmosféricas y/o erosión de suelo. Se ha demostrado ampliamente que las capas superiores del suelo están enriquecidas en muchos metales y otros elementos vinculados a la deposición atmosférica de fuentes naturales y antropogénicas² (Rodríguez Eugenio et al., 2019).

De forma específica, la deposición es el proceso por el cual los contaminantes atmosféricos son depositados desde la atmósfera a la superficie de la tierra, comprendiendo dos tipos: deposición húmeda y deposición seca como se muestra en la Ilustración III-3 (Estrada Paneque et al., 2016). De esta forma, ciertos compuestos considerados como contaminantes del aire también tienen participación en la contaminación de la tierra.

La deposición húmeda es el proceso que incluye dos formas: la eliminación del contaminante por la precipitación o la incorporación del contaminante a la nube para posteriormente pasar a la superficie de la tierra con la lluvia. Por otro lado, existe la deposición seca que ocurre en ausencia de precipitación.

² De origen humano o derivado de la actividad del hombre. Por ejemplo, debido a las lluvias radiactivas que siguieron al accidente de Chernóbil, habrá presencia de radionúclidos en los suelos por siglos. Se necesitarán 50 años para lograr una reducción del 50% de los radionúclidos como ^{239/240}Pu o ²⁴¹Am en zonas que están hasta a 200 kilómetros de distancia de Chernóbil. (Rodríguez Eugenio et al., 2019)

En particular, la deposición seca es un proceso que, como se observa en la Ilustración III-3, es un ciclo de eliminación importante para compuestos en fase vapor y particulado, tales como: ozono (O_3), monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2).

Generalmente, depende además de: la naturaleza del contaminante, factores meteorológicos, así como, en la capacidad de la vegetación, suelo y agua para captar sustancias. Sin embargo, se ha observado que los flujos de deposición seca para NO_2 no estaban afectados solo por factores meteorológicos y parámetros fisiológicos de las plantas, sino también por reacciones químicas (Galán Madruga & Fernández, 2006).

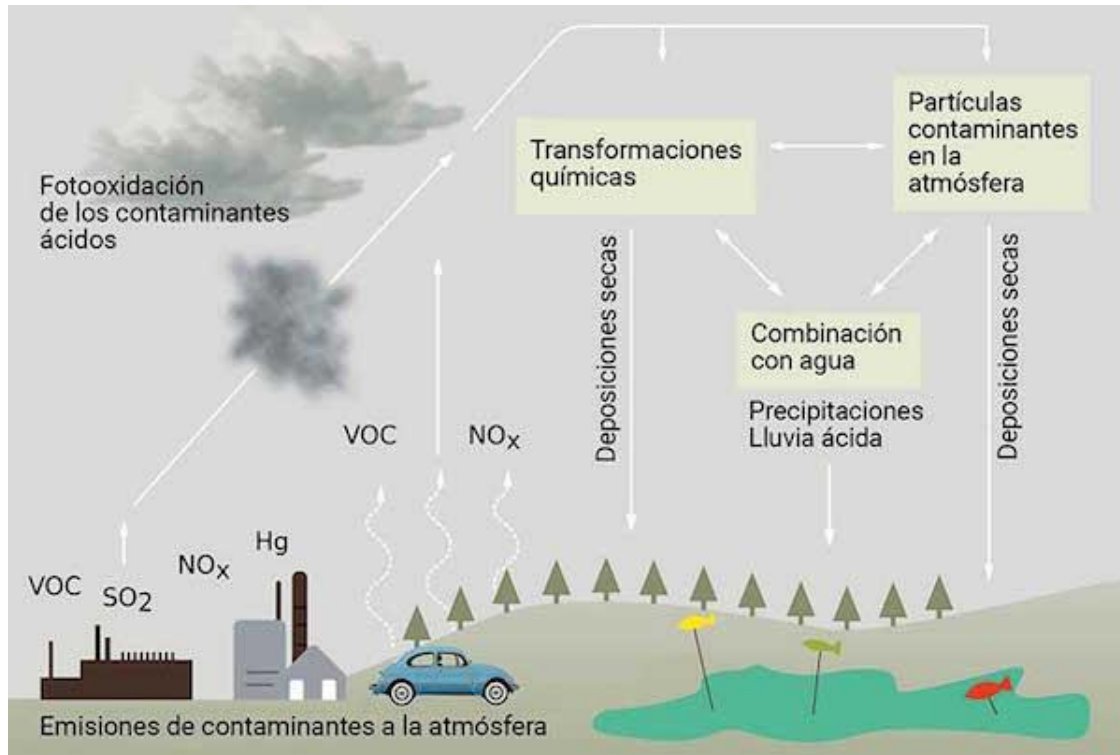


Ilustración III-3 Ciclo de deposición de contaminantes a la tierra.

Fuente: <https://agua.org.mx/lluvia-acida-enemigo-invisible/>

La población mundial, que según las predicciones superará los 9 mil millones de habitantes para el año 2050, requerirá del abasto de alimentos y agua suficientes de buena calidad. La cantidad y la calidad nutricional de estos alimentos es un factor importante para considerar, ya que contribuyen a la salud humana. El 95% de la producción de alimentos depende del suelo, pero sólo aquellos sanos pueden prestar los servicios ecosistémicos necesarios para asegurar el abasto de alimentos y fibra. Así, la contaminación del suelo reduce la seguridad alimentaria y el rendimiento agrícola debido a los niveles tóxicos de contaminantes que originan cultivos inseguros para el consumo. Además, el exceso de metales pesados en el suelo, tales como arsénico, cadmio, plomo y mercurio alteran el metabolismo de las plantas, disminuyendo la productividad de los cultivos cuando estos ingresan a la cadena alimentaria. También, estos contaminantes generan riesgos para la seguridad alimentaria de los humanos, así como la de los animales, los recursos hídricos, los medios de vida rurales y la salud humana (Rodríguez Eugenio et al., 2019).

Los principales contaminantes para las tierras de cultivos, que son el mayor reto de investigación y aplicación, provienen de fertilizantes, plaguicidas, residuos de antibióticos en el agua de riego o en el abono animal; así como, para el tratamiento de infecciones en los campos.

c. Aire

Por lo general, este tipo de contaminación suele ser causada por la emisión de distintos compuestos, tales como: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), plomo, ozono (O₃), material particulado, dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), benceno (C₆H₆), butadieno (C₄H₆) y humo de motores Diesel. Este tipo de contaminación proviene de diversas fuentes móviles o fijas, como lo son: los automóviles, la producción industrial del butadieno (producto del proceso de la destilación del petróleo), las centrales eléctricas a base de carbón y las fuentes locales pequeñas, como las tintorerías de limpieza a seco (Estrada Paneque et al., 2016).

En todo el mundo, nueve de cada diez personas respiran aire contaminado; debido a esto, en 2019, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró el 7 de septiembre como el “Día Internacional del Aire Limpio por un Cielo Azul”, que se celebró por primera vez en el año 2020 (Naciones Unidas, 2021).

En México, durante el taller, “Epidemiología Ambiental, Contaminación del Aire y Capacitación para el uso del AirQ+”, realizado en el Bosque de Chapultepec de la Ciudad de México del 27 al 31 de mayo del 2019, se comentó que la contaminación del aire es el riesgo ambiental, más importante a nivel mundial, para la salud. El secretario del Medio Ambiente de la Ciudad de México, Robles García, indicó durante su participación en el taller que:

“Una de las cosas que le pasa a la atmósfera es semejante a lo que sucede con los residuos urbanos, donde los llevamos, en el mejor de los casos, a un relleno sanitario. En este caso, llevamos a la atmósfera un montón de basura porque finalmente es eso y peor aún, porque no la vemos. Esa basura que estamos dejando en la atmósfera o en muchas otras partes del planeta afecta a toda la vida y en esa medida el conocimiento científico y el fortalecimiento de capacidades se vuelve central.” (Secretaría del Medio Ambiente, 2019).

En México, el Gobierno de la Ciudad de México (CDMX) por medio de su programa de Calidad de Aire, realiza monitoreos de forma continua sobre los diferentes contaminantes del aire en diferentes puntos estratégicos dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM): Pedregal, Tlalnepantla y Taxqueña. De la Ilustración III-4 a la III-6, se observa la variación que tienen algunos contaminantes del aire, como lo son: el ozono troposférico, SO₂ y CO a lo largo de los últimos 30 años. Dichos registros indican el promedio de lectura; así como, la cantidad mínima y máxima de cada contaminante medido desde la estación en comparación con el histórico más alto de lectura en la CDMX.

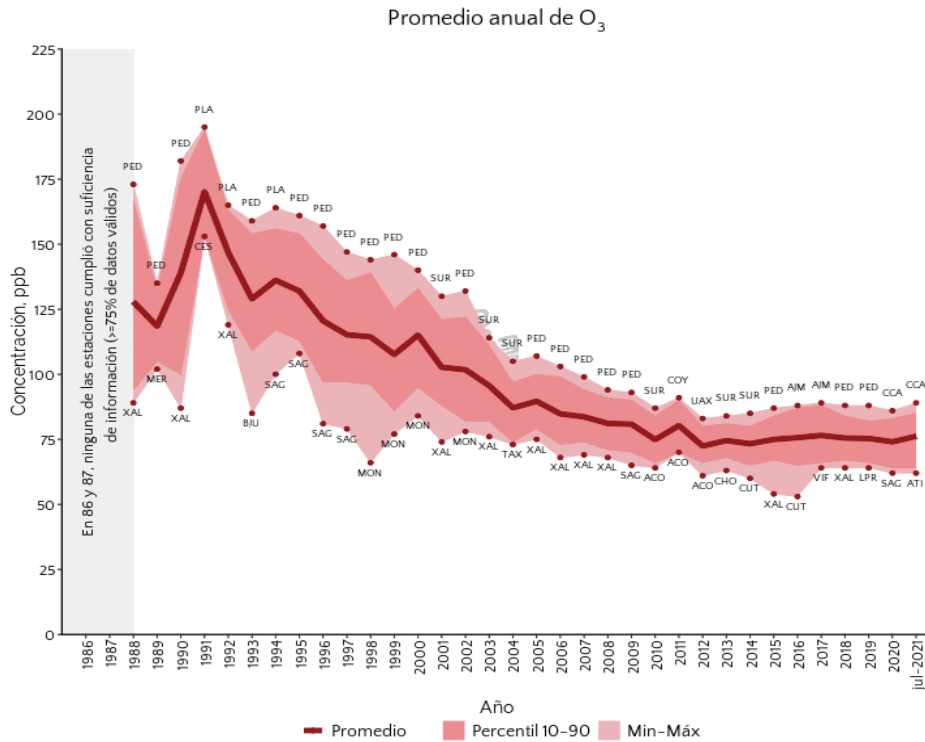


Ilustración III-4 Variación de concentración de ozono con promedio, así como el mínimo y máximo medido en partes por billón (ppb) medidos desde la estación de Pedregal.

Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aqBhnmOkZA==%27>

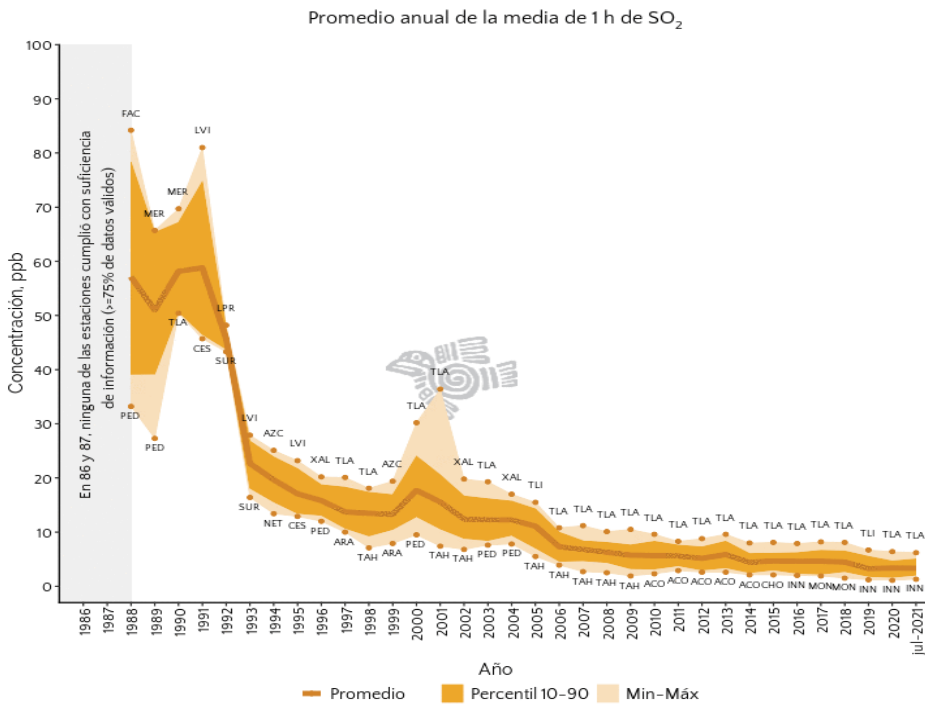


Ilustración III-5 Variación de concentración de SO₂ con promedio, así como el mínimo y máximo medido en partes por billón (ppb) medidos desde la estación de Tlalnepantla.

Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aqBhnmOkZA==%27>

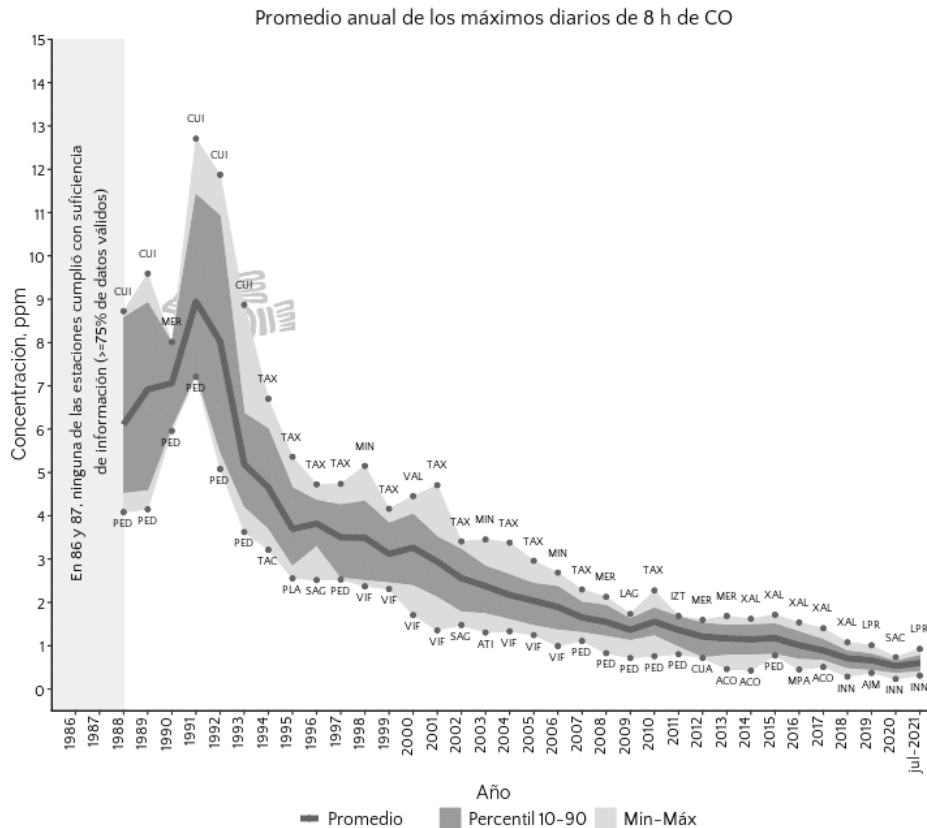


Ilustración III-6 Variación de concentración de CO con promedio, así como el mínimo y máximo medido en partes por billón (ppb) medidos desde la estación de Taxqueña.

Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aqBhnmOkZA==%27>

Como se observa en las Ilustraciones III-4 a la III-6, los tres compuestos gaseosos (O_3 , SO_2 y CO) coinciden en sus máximos históricos de emisión a inicios de la década de los 90s. Específicamente el ozono presentó su máximo de emisión entre 1990-1991, alcanzando cerca de 200 ppb. De forma paulatina sus emisiones fueron disminuyendo hasta que, a partir del año 2011, su registro promedio se ha mantenido cerca de las 75 ppb. Con respecto al SO_2 , su máximo de emisión se registró entre 1988 y 1992, alcanzando emisiones promedio entre 70-80 ppb. Al igual que el ozono, las emisiones de SO_2 disminuyeron progresivamente hasta alcanzar valores menores a 10 ppb, a partir del año 2006. Finalmente, las emisiones de CO presentan un comportamiento similar a las de los otros dos contaminantes, mostrando sus máximos de emisión (10-13 ppb) entre 1991-1992. A partir del año 2010, sus emisiones son inferiores a 2 ppb.

Por todo lo anterior, el Gobierno Federal de México es el responsable de establecer los estándares para la protección de la salud pública y vigilar su cumplimiento. Estos estándares se encuentran publicados en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), tal y como se muestra en la

Tabla III-1. Dichas NOM son de observación obligatoria en todo el país e indica el límite establecido para O₃, SO₂ y CO (Calidad del Aire, n.d.).

Tabla III-1 Listado de NOM encargadas de regular los gases de O₃, SO₂ y CO con su respectiva fecha de publicación y límites establecidos para cada gas.

Partícula	NOM	Fecha de publicación	Límite establecido
O ₃	NOM-020-SSA1-2014 ³	19/agosto/2014	0.070 ppm, máximo anual del promedio móvil de 8 h
SO ₂	NOM-022-SSA1-2019 ⁴	20/agosto/2019	0.040 ppm, máximo promedio de 24 h
CO	NOM-021-SSA1-1993 ⁵	23/diciembre/1994	11.0 ppm, máximo anual como promedio móvil de 8 h

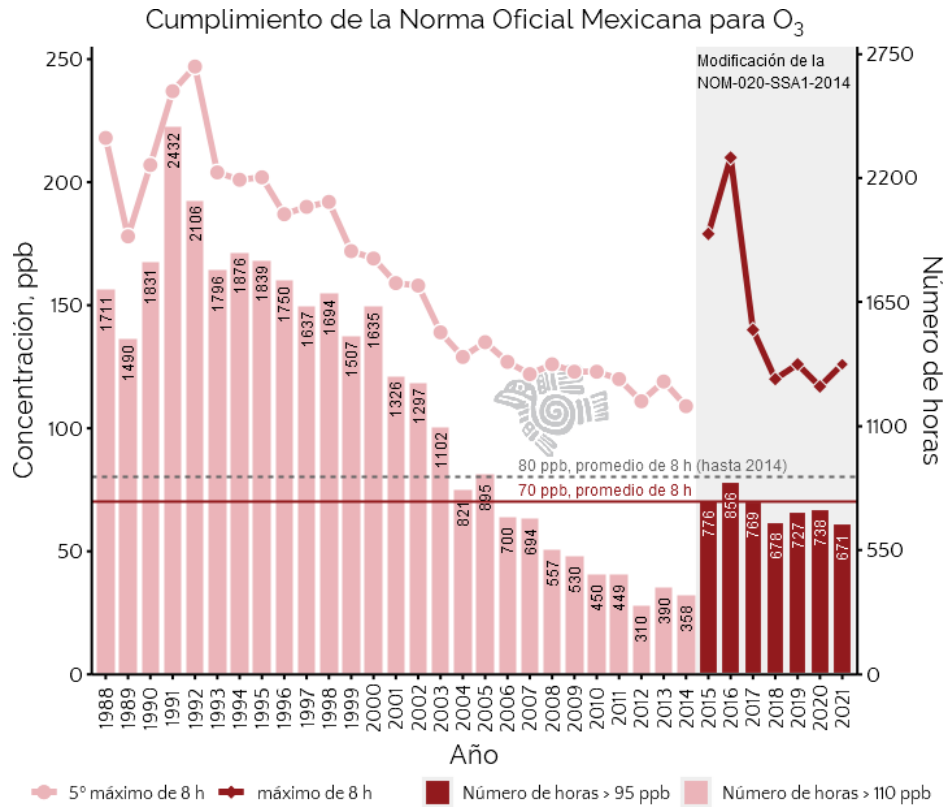
Fuente: Página web del Gobierno de la Ciudad de México en la sección Calidad del aire en la ruta; Monitoreo - El monitoreo de la calidad del aire – Normatividad.

El cumplimiento de estas normas es monitoreado por el mismo gobierno y se observa el cumplimiento de ellas, mediante los datos proporcionados por el programa de Calidad del Aire, siendo reportadas y actualizadas de forma constante en el portal de la Ciudad de México en la sección Calidad del Aire. En la Ilustración III-7, se muestra el límite indicado en la NOM-020-SSA1-2014 y los registros que se han hecho en diferentes años para el caso particular del ozono. De la misma forma, en la Ilustración III-8 e Ilustración III-9, se muestra el límite y la concentración para SO₂ y CO, respectivamente.

³ <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-020-SSA1-2014.pdf>

⁴ <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-021-SSA1-1993.pdf>

⁵ <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-022-SSA1-2019.pdf>



Nota: Los valores límite de las NOM a partir de 2015 son: 70 ppb máximo anual del promedio de 8 h y 95 ppb promedio horario

Ilustración III-7 Cumplimiento de la NOM-020-SSA1-2014 estableciendo el límite de O₃.

Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aqBhnmOkZA==%27> el lunes 28 de febrero de 2022.

Referente al ozono, en la Ilustración III-7, la concentración máxima se presentó en el año 1991, llegando hasta 2,432 ppb. Desde entonces, se ha generado una disminución en su concentración. Entre 2006 y 2014, la concentración cumplió con lo establecido en la norma NOM-020-SSA1-2014. El valor mínimo de concentración se registró en el año 2012, siendo 28 ppb. A pesar de lo anterior, durante los años 2015 al 2017, la concentración superó lo establecido en la norma; posterior a estos años, se logró reducir el valor y entrar nuevamente en concentraciones aceptadas por la normatividad.

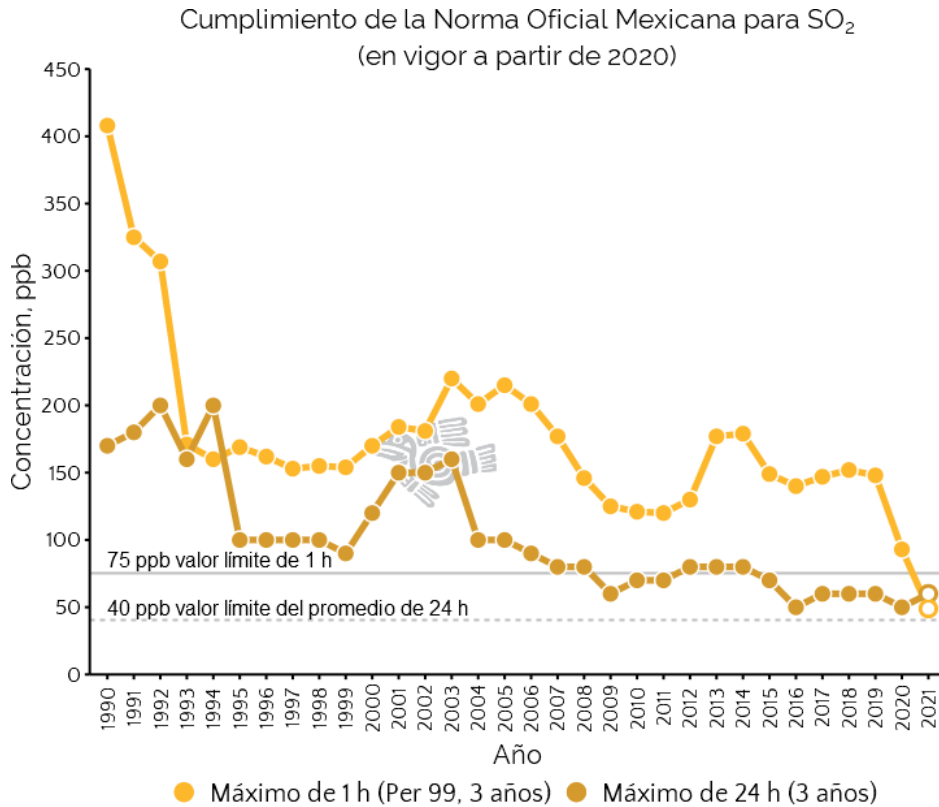


Ilustración III-8 Cumplimiento de la NOM-022-SSA1-2019 estableciendo el límite de SO₂.

Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aqBhnmOkZA==%27> el lunes 28 de febrero de 2022.

Por otro lado, en la Ilustración III-8 se observa la concentración que se ha reportado para el SO₂; así como, el límite establecido por la NOM-022-SSA1-2019. Es notorio que la concentración del dióxido de azufre ha venido a la baja desde 1990, donde se registró la mayor concentración de este compuesto gaseoso (aproximadamente 400 ppb en una hora). A partir de que la normatividad entró en vigor en el año 2020, se observa que la concentración reportada en una hora presenta una gran reducción, todavía sin entrar en valores aceptados. Sin embargo, para el año 2021, la concentración ya se encontró en valores aceptados por la regulación publicada. Se puede decir que la liberación de este gas ha sido controlada con éxito por la norma, ya que desde que entró en vigor, la concentración de SO₂ ha tenido una reducción histórica.

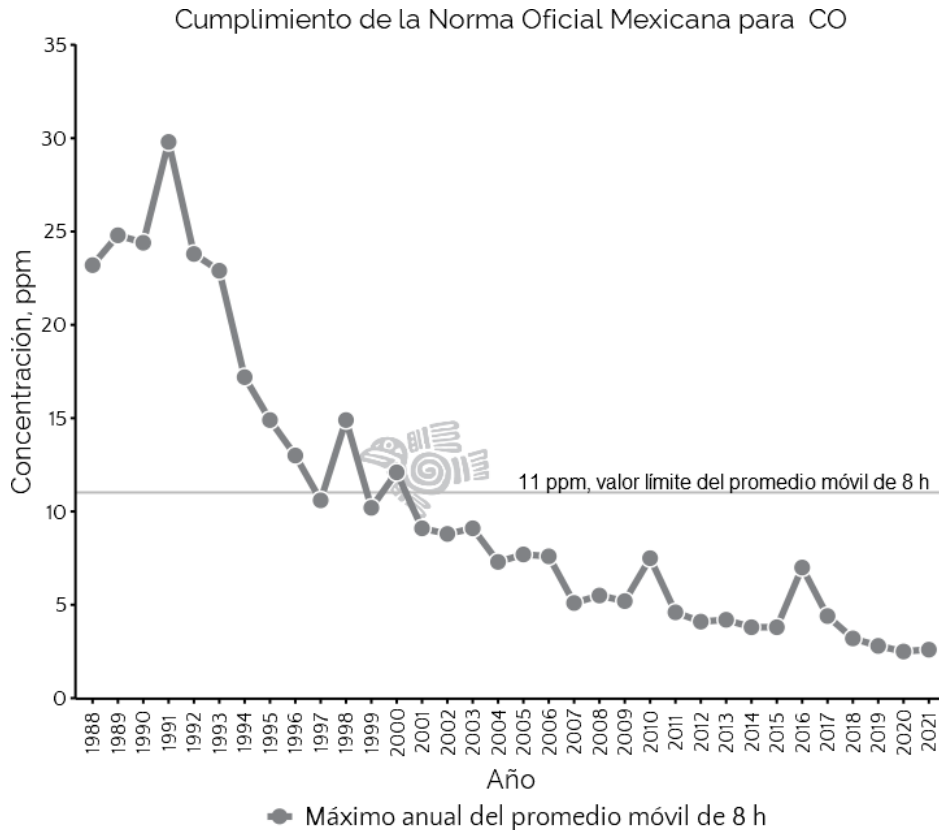


Ilustración III-9 Cumplimiento de la NOM-021-SSA1-1993 estableciendo el límite de CO.

Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aqBhnmOkZA==%27> el lunes 28 de febrero de 2022.

Finalmente, en la Ilustración III-9 se muestra el comportamiento de la concentración para el CO, siendo la mayor la reportada en el año 1991, llegando a 30 ppm. La NOM-021-SSA1-1993 establece un límite promedio de 11 ppm que se ha cumplido de forma constante desde el año 2001. Desde el 2019 y hasta el 2021 se ha mantenido el mínimo histórico de 4 ppm.

Altos niveles de contaminación en el aire pueden aumentar la carga de morbilidad derivada de accidentes cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y agudas, entre ellas, el asma. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que en 2016, aproximadamente el 70% de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación atmosférica se debieron a cardiopatías isquémicas (CI) y accidentes cerebrovasculares; mientras que, el 22% de las muertes se debieron a enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) e

infecciones respiratorias agudas (IRA) y el 8% de las muertes se debieron al cáncer de pulmón. Esta estimación se observa en la Ilustración III-10, donde se muestra gráficamente cual es la causa de muertes prematuras con mayor frecuencia durante el año 2016 (OMS, 2021).

Muertes prematuras por alta contaminación atmosférica

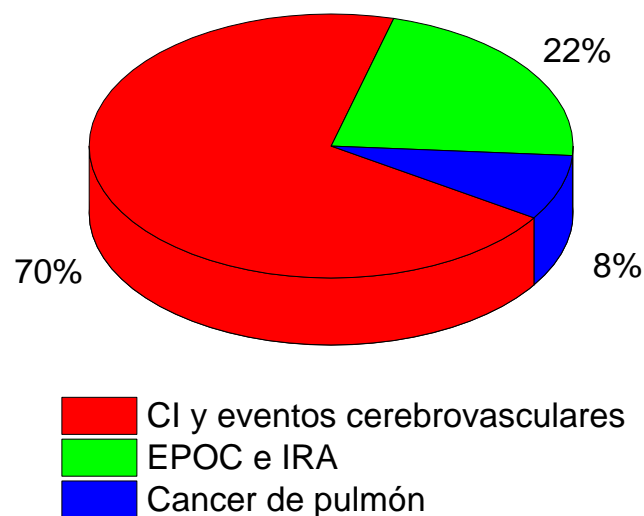


Ilustración III-10 Muertes prematuras por alta contaminación atmosférica.

En particular, el CO actúa por asociación con la hemoglobina de la sangre, formando carboxihemoglobina, reduciendo en gran cantidad la oxigenación por medio de la sangre hacia las células del cuerpo humano. Lo anterior es debido a que el CO es 210 veces más reactivo que el oxígeno con la hemoglobina. Esto produce pérdidas de reflejos, dolores de cabeza, náuseas e incluso vómitos; sin embargo, estos efectos no se consideran de alta gravedad, debido a que es un daño reversible, generando de nuevo hemoglobina.

Por otro lado, la concentración de ozono en la estratosfera es de vital importancia, ya que protege la vida del planeta de los rayos ultravioleta (UV) provenientes del sol, los cuales son peligrosos para las formas de vida que habitan en el planeta. Sin embargo, la presencia de este compuesto en la troposfera se considera como un contaminante gaseoso secundario, ya que afecta la salud humana a través de la alta reactividad que muestra esta sustancia en presencia de compuestos orgánicos con doble enlace, como lo son: las proteínas y elementos constitutivos de las células. Esta situación conduce a transformaciones químicas que pueden dar lugar incluso a mutaciones a nivel celular (Sandoval, 2016).

Por lo tanto, la contaminación atmosférica es el mayor riesgo ambiental para la salud humana y una de las principales causas evitables de muertes y enfermedades en todo el mundo (Naciones Unidas, 2020).

2. La capa atmosférica

La atmósfera terrestre tiene el grosor perfecto para mantener la temperatura templada del planeta. Es el único planeta del sistema solar que se sabe tiene las condiciones necesarias para que exista vida. Está compuesta por una combinación de gases, que incluye nitrógeno (78.1%), oxígeno (20.9%), argón (0.93%), dióxido de carbono (0.034%) y trazas de otros gases, tales como helio y ozono (Daniel Pabón et al., 1998).

La atmósfera de la Tierra tiene cinco capas diferentes. Van desde el suelo hasta el espacio exterior (NASA, 2019) como se observa en la Ilustración III-11, y en donde a diferentes alturas se extienden las diferentes capas con diversas características, compuestos y espesor.

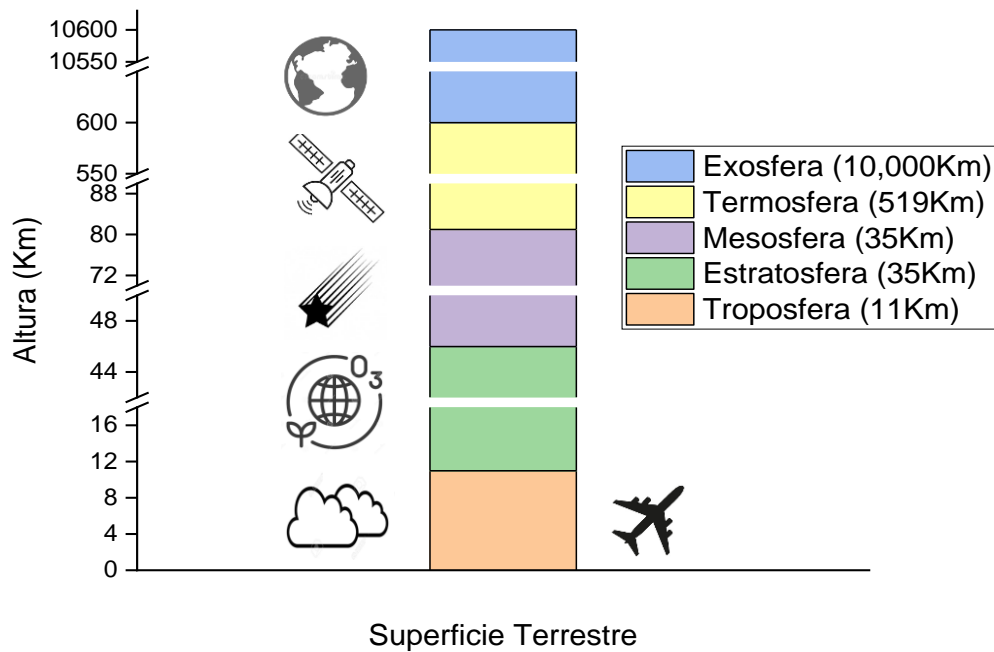


Ilustración III-11 Distribución de las capas atmosféricas.

Datos obtenidos de la NASA disponibles en <https://spaceplace.nasa.gov/atmosphere/sp/>

La troposfera es la capa más cercana a la superficie de la Tierra. Ésta recibe su nombre del clima que cambia constantemente y mezcla los gases. Además, contiene el aire que respiramos y las nubes en el cielo. En esta capa, el aire es más denso, ya que contiene tres cuartas partes de la masa de toda la atmósfera. Su composición es de 78% nitrógeno, 21% oxígeno y 1% de argón, vapor de agua y CO₂, entre otros.

La segunda capa es la estratosfera, en ella, no hay tormentas ni turbulencias para mezclar el aire, por lo que el aire frío y pesado está en la parte inferior y el aire cálido y ligero está en la parte superior. Eso es lo contrario de cómo funciona la troposfera. La gran importancia de esta capa de la atmósfera es la presencia de la capa de ozono; la cual, ayuda a proteger la superficie terrestre de la radiación ultravioleta (UV) proveniente del sol. Así, la capa de ozono absorbe la mayor parte de la radiación UV que envía el sol. Por tanto, la vida, tal como la conocemos, no sería posible sin esta capa de protección (NASA, 2019).

Otra interesante parte de la atmósfera es denominada “ionosfera”. Ésta se encuentra sobre la mesosfera, termosfera y exosfera. Es una parte muy activa en la atmósfera, crece y se encoge dependiendo de la energía que absorbe del sol. Su nombre proviene del hecho de que los gases en estas capas son agitados por la radiación solar para formar iones. En esta sección es donde suceden las auroras polares (NASA, 2019).

3. Gases contaminantes

Los principales mecanismos de contaminación atmosférica son los procesos industriales que implican combustión, tanto en industrias como en automóviles y calefacción de residenciales. Igualmente, algunas industrias emiten gases nocivos en sus procesos productivos, como cloro o hidrocarburos que no han realizado combustión completa.

Los contaminantes de la atmósfera se dividen en dos tipos: primarios y secundarios. La primera categoría corresponde a aquellos que se emiten de forma directa a la atmósfera, generando impacto negativo. Un ejemplo es el SO_2 , que daña directamente la vegetación y es irritante para los pulmones. Por otro lado, los contaminantes secundarios son producto de procesos químicos que ocurren en la atmósfera sobre los contaminantes primarios o sobre especies no contaminantes. Ejemplo de estos compuestos son: el ácido sulfúrico (H_2SO_4) proveniente de la oxidación del SO_2 ; el NO_2 por oxidación del NO y el O_3 proveniente del O_2 .

Los contaminantes gaseosos más comunes son el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x) y el ozono; considerando que este último en ambientes exteriores e interiores, aparece en diferentes concentraciones (Manahan, 2007).

Existen otros compuestos que tienen gran importancia y han sido objeto de varios estudios científicos; hidrocarburos donde uno o más átomos de hidrógeno ha sido sustituido por átomos de halógenos. Estos compuestos han sido usados principalmente en equipos de refrigeración, y van desde los clorofluorocarburos (CFC), pasando por hidrocloreofluorocarburos (HCFC) y hasta llegar a los hidrofluorocarburos (HFC) mediante reacciones de reducción.

En la Ilustración III-12, se enlistan los diferentes compuestos de interés que se analizarán en este trabajo para tener un panorama directo de ellos. También, se muestra el contenido que se va a desglosar a detalle; proporcionando información, datos y procesos que los involucra.

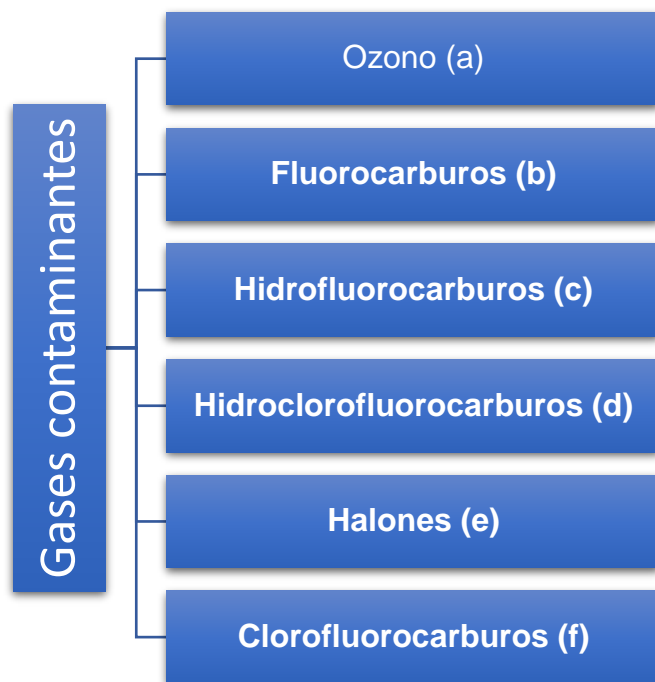


Ilustración III-12. Gases contaminantes por revisar en el trabajo.

a. Ozono

El ozono se encuentra desde la superficie terrestre hasta una altura aproximada de 70 km, pero la mayor cantidad (cerca de 90%) se ubica en la estratósfera entre los 19 y los 44 km, con una máxima concentración entre los 19 y 23 km. La capa de máxima concentración se conoce como ozono estratosférico o capa de ozono. Ésta varía según la época y el lugar geográfico; además, constituye el principal filtro de la radiación UV proveniente del sol. Por otro lado, el ozono que se encuentra en la troposfera recibe el nombre de ozono troposférico, y sus mayores concentraciones se localizan entre la superficie terrestre y los 10 m de altura. Este compuesto está considerado como el principal contaminante fotoquímico (Daniel Pabón et al., 1998).

El ozono a nivel de la troposfera es uno de los principales componentes de la niebla tóxica. Éste se forma por la reacción con la luz solar (fotoquímica) de contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NOx) procedentes de las emisiones de vehículos o la industria y los compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos también por los vehículos, disolventes y la industria. Los niveles de ozono más elevados se registran durante los períodos de tiempo soleado (OMS, 2021).

Existe un equilibrio entre el NO y su forma oxidada, el dióxido de nitrógeno (NO₂), el cual es fuertemente dependiente de la concentración que exista de NO, la temperatura y la distribución atmosférica. Este equilibrio está dado por la reacción R1´.



Durante las horas de luz diurna, por efecto de la fotólisis, el NO₂ se descompone generando NO y un radical O, el cual, posteriormente reacciona con O₂ para generar O₃ (Kim et al., 2011). Este mecanismo se encuentra detallado por la secuencia de reacciones R2´ y R3´.



Por otro lado, una pequeña fracción del NO generado de la reacción R2´ puede reaccionar con el radical hidroperoxilo (HO₂·) u otro radical peróxido, regenerando al NO₂ y provocando que el proceso pueda repetirse (ciclo de NOx), dando lugar a un incremento en la concentración ambiental de ozono en la troposfera (Galán Madruga & Fernández, 2006), al que se le considera como un gas contaminante (Sandoval, 2016).

Según datos obtenidos por del Gobierno de la Ciudad de México en el programa Calidad del Aire, se observa a detalle dicho comportamiento descrito anteriormente: en horas de luz diurna, disminuye la concentración de NO₂ debido a su reducción, como se puede apreciar en la Ilustración III-14, acompañado del

aumento de la concentración de ozono que se muestra en la Ilustración III-13 Variación en la concentración de O₃ a diferentes horas del día. Lecturas de diferentes años. Estos comportamientos se han repetido en análisis que se generan cada cinco años, tanto para la formación del ozono, como del consumo del dióxido de nitrógeno.

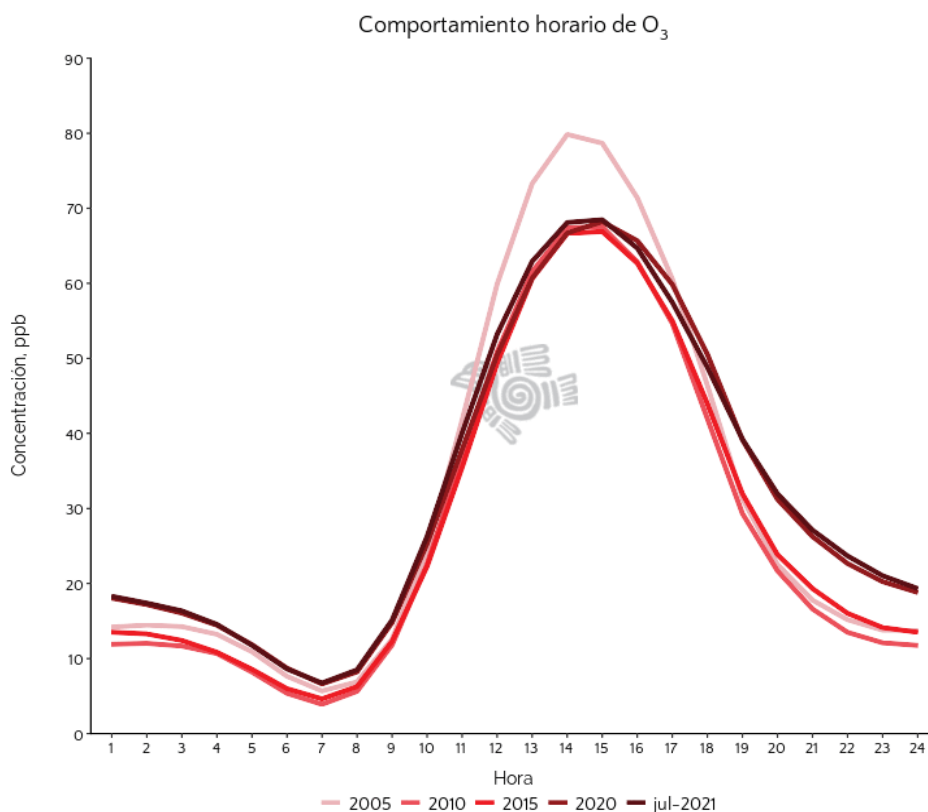


Ilustración III-13 Variación en la concentración de O₃ a diferentes horas del día. Lecturas de diferentes años.

Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aqBhnmOkZA==%27>

En particular, al analizar la

Ilustración III-13 se demuestra que el punto donde la concentración de O₃ llega al máximo es desde las 14 a las 15 horas del día, lo cual es evidencia de que las reacciones R2 y R3' se llevan a cabo, ya que es cuando la radiación UV proveniente del sol es máxima.

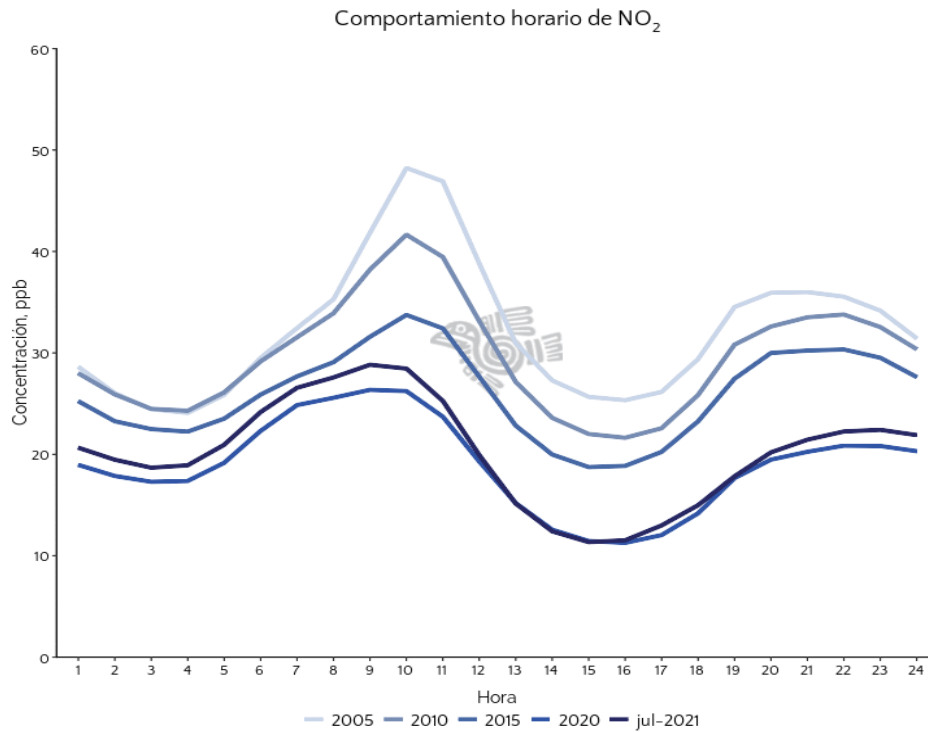
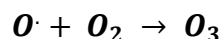
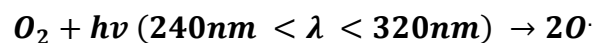


Ilustración III-14 Variación en la concentración de NO₂ a diferentes horas del día. Lecturas de diferentes años.

Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aqBhnmOkZA==%27>

Por otro lado, en la Ilustración III-14 se observa el comportamiento de la concentración para el NO₂ en función del tiempo. Por lo descrito en la reacción R2' y R3', la concentración baja por efecto de la fotólisis en la hora de máxima luz natural. De igual forma, la concentración sigue la tendencia de tener su punto máximo a las 10 horas del día; sin embargo, con el paso de los años, este punto máximo se ha reducido considerablemente gracias a las acciones que se han tomado en cuenta para prevenir la contaminación del aire.

Por su parte, el ozono estratosférico es formado en la atmósfera cuando la radiación UV alcanza la estratosfera, disociando las moléculas de O₂ en oxígeno atómico (O). Posteriormente, el oxígeno atómico se combina rápidamente con otras moléculas de diatómicas de oxígeno (O₂) para formar el ozono (O₃) (Daniel Pabón et al., 1998).

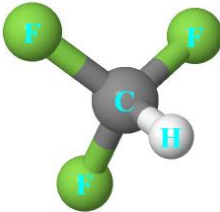
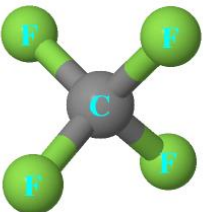
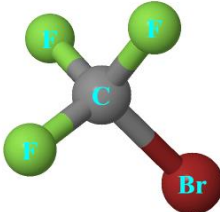
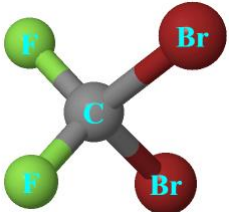
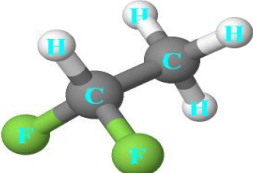
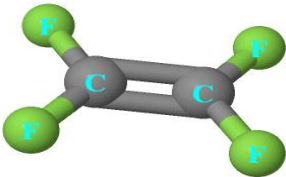


Se estima que la contribución al efecto invernadero, provocado por el O₃ generado por el hombre, es de aproximadamente el 20%; mientras que, la de los gases de efecto invernadero (GEI) comunes, como lo son: CO₂, CH₄, N₂O y O₃ troposférico, se estima en 50, 15, 5 y 7%, respectivamente (Kim et al., 2011).

b. Fluorocarburos (FC)

Los fluorocarburos (FC) son compuestos derivados de los hidrocarburos mediante sustitución por flúor de todos o algunos de sus átomos de hidrógeno. En ocasiones también pueden tener átomos de bromo. Por lo tanto, los compuestos más comunes de los FC se pueden expresar de acuerdo con las siguientes fórmulas generales: CBr_nF_{4-n} y C₂Br_nF_{6-n}, donde "n" es igual o mayor a cero (Kim et al., 2011). En la Tabla III-2, se muestran algunos ejemplos de compuestos derivados de hidrocarburos con sus átomos de hidrógeno sustituidos por diferentes halógenos.

Tabla III-2. Ejemplos de algunos fluorocarburos.

Nombre	Estructura	Nombre	Estructura
Trifluorometano		Tetrafluorometano	
Bromotrifluorometano		Dibromodifluorometano	
1, 1-difluoretano		Tetrafluoretileno	

Los hidrocarburos en los que se ha reemplazado alguno de los átomos de hidrógeno por bromo, además de los que fueron por flúor (es decir hidrobromofluorocarburos), suelen incluirse en la clasificación de fluorocarburo. (Consejo de Salud Ocupacional, 2002).

c. Hidrofluorocarburos (HFC)

Los hidrofluorocarburos (HFC) son un grupo de sustancias que contienen átomos de carbono, flúor e hidrógeno. Son generalmente gases incoloros e inodoros a temperatura ambiente. La mayoría de ellos presentan una gran estabilidad química, no reaccionando con otros elementos o compuestos.

Éstos compuestos no se encuentran de manera natural en la atmósfera y su presencia en ella se debe completamente a actividades industriales, como la manufactura de aluminio y semiconductores. Los HFC se consideran la tercera generación de gases refrigerantes, ya que han sido creados para sustituir a los clorofluorocarburos (CFC) y los hidroclorofluorocarburos (HCFC), los cuales fueron prohibidos por el Protocolo de Montreal en 1987, debido a su efecto en la degradación de la capa de ozono en la estratosfera (Castro & Ramírez, 2019).

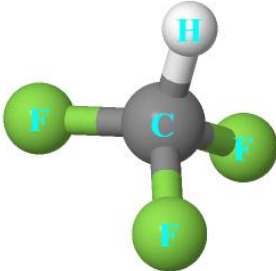
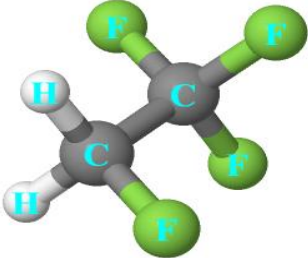
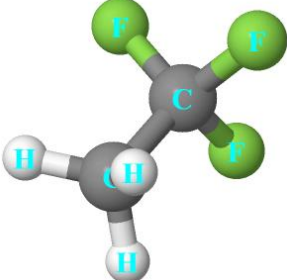
Fueron considerados sustitutos a largo plazo de las sustancias agotadoras de ozono (SAO) y no estuvieron controlados por el Protocolo de Montreal. Sin embargo, la presencia de átomos de flúor, en su composición, provoca que actúen como un GEI sintético. Los HFC se utilizan principalmente en equipos de refrigeración y aire acondicionado; así como, para agentes propulsores en los aerosoles y como material aislante en espumas para hogares y edificios (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2007).

Los HFC tienen un alto potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés: Global Warming Potential), lo que significa que tienen una mayor capacidad para absorber el calor en la atmósfera en comparación con una masa similar de CO₂. Por ejemplo, la liberación de una tonelada de HFC-23 equivale a la liberación de 14,800 toneladas de CO₂ a la atmósfera, por lo cual, están fueron agregados al Protocolo de Montreal en la enmienda de Kigali para controlar su

producción y posteriormente, sustituirlos con algún otro compuesto que cumpla las mismas funciones sin tener el efecto como GEI.

En la Tabla III-3, se encuentra la estructura de algunos compuestos de HCF. Considerando que los HFC fueron vistos como alternativas para sustituir los CFC, el HFC-23 se implementó como un reemplazo en los equipos y sistemas que usaban originalmente CFC-13. Por otra parte, el HFC-134a fue el sustituto directo para el compuesto CFC-12. No sólo los CFC han sido sustituidos por los compuestos HFC, el Halón-1301 fue reemplazado en sus aplicaciones por el HFC-125 cuyas características son muy similares. Dentro del sector de la aviación civil, este HFC es de gran interés, ya que se usa en aviones militares en algunos países.

Tabla III-3 Ejemplos de algunos hidrofluorocarburos.

Nombre	Estructura	Clave
Trifluoruro de metilo		HFC-23
1,1,1,2-Tetrafluoroetano		HFC-134a
1, 1, 1-Trifluoetano		HFC-143a

Con la completa eliminación de los CFC, en el año 2010, aunado a la eliminación programada de la mayoría de los HCFC, para el año 2030, los HFC son los compuestos más utilizados en aplicaciones que tradicionalmente usaban SAO. La contribución de los HFC al cambio climático puede verse como un efecto secundario negativo, no intencionado de estas acciones.

Alrededor de un tercio de todos los alimentos producidos a nivel mundial para el consumo humano se desperdicia cada año, en gran parte, por la falta de un transporte con sistema de enfriamiento; así como, por un bajo rendimiento en los sistemas comerciales de refrigeración. El desperdicio de alimentos asciende a miles de millones de dólares estadounidenses al año, desperdiciando recursos preciosos como la tierra, el agua y la energía. Esta actividad genera aproximadamente el 8 por ciento del total de gases de efecto invernadero por año a nivel mundial.

Por otro lado, el uso de HFC en equipos de refrigeración cubren la demanda creciente para mantener los alimentos en buen estado; y así, obtener un equilibrio entre la producción y consumo alimenticio. De la misma forma, se uso está en los servicios de cadenas de traslado en frío: desde el punto de producción hasta el punto final donde es consumido, reduciendo la cantidad de pérdidas de comida generada por putrefacción al no mantener un medio adecuado de conservación (Naciones Unidas: Secretaría de Ozono, 2021).

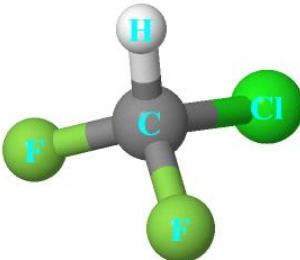
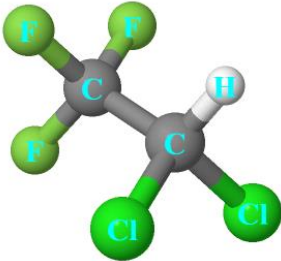
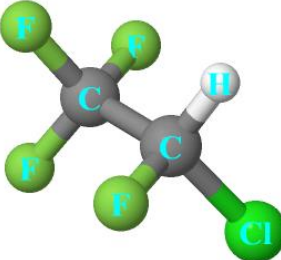
d. Hidroclorofluorocarburos (HCFC)

Los hidroclorofluorocarburos (HCFC) son compuestos formados por átomos de cloro, flúor, hidrógeno y carbono. Aunque son destructores de la capa de ozono, han sido introducidos temporalmente como sustitutos de los CFC. La principal fuente de contaminación de estas sustancias son los equipos de refrigeración, tanto en estado operativo, como al final de su vida útil. También se encuentran presentes en aerosoles, pinturas, barnices, etc. No existen fuentes naturales de contaminación, ya que se trata de sustancias sintetizadas por el hombre (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2007).

Los efectos producidos por la inhalación de los HCFC suelen ser confusión mental y somnolencia, pero en elevadas concentraciones se puede llegar a la pérdida del conocimiento y asfixia. El contacto con el líquido provoca congelación en la piel, enrojecimiento y dolor en los ojos. Los HCFC se usaron como sustancias sustitutivas de los CFC debido a su menor toxicidad y persistencia en el medio ambiente, aun así, son sustancias cloradas destructoras de la capa de ozono (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2007).

En la Tabla III-4 se observan algunos ejemplos de HCFC con su nombre, estructura y la clave que se le ha asignado como forma de identificación. Una característica de estos compuestos es la presencia de uno o más átomos de hidrógeno debido a una reacción de reducción aplicada a su respectivo CFC.

Tabla III-4 Ejemplos de algunos hidroclorofluorocarburos.

Nombre	Estructura	Clave
Clorodifluorometano		HCFC-22
2, 2-dicloro-1, 1, 1-trifluoroetano		HCFC-123
1-cloro-1, 2, 2, 2-tetrafluoroetano		HCFC-124

Los HCFC y el tetracloruro de carbono (CCl_4) se emplean comúnmente como materias primas en síntesis químicas. En el caso del CCl_4 , éste se usa como agente de proceso para la producción de otros productos químicos. Las SAO que se usan como materias primas no suelen liberarse a la atmósfera y por ende, no contribuyen al agotamiento de la capa de ozono (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2001).

e. Halones

Los halones son compuestos formados por C, F, Cl, Br y H. Se caracterizan por ser sustancias con gran capacidad de dañar la capa de ozono, ya que contienen bromo, que es el átomo más efectivo en la destrucción de ozono, llegando a ser incluso más dañinos que los CFC.

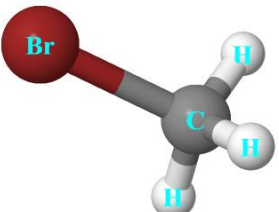
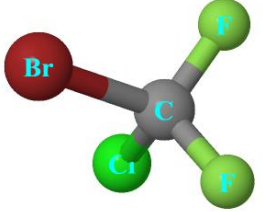
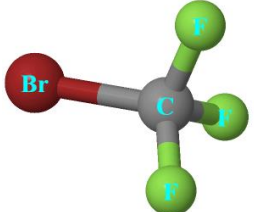
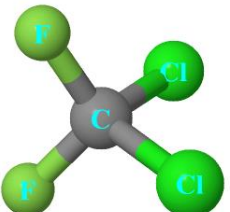
Los halones son sustancias artificiales, fabricadas por el hombre, por lo que se carece de fuentes naturales de emisión y son sustancias bastante nocivas para el ser humano, por lo que, se debe extremar la prudencia en su exposición y manipulación.

Para identificar las diferentes especies que existen, se ha generado una forma de nomenclatura la cual inicia por la palabra "Halón" seguido de cuatro números indicando la cantidad de átomos de C, F, Cl y Br, respectivamente. Si el último dígito es cero, se omite quedando únicamente en 3 dígitos.

En la Tabla III-5, se encuentra la estructura, nombre y la nomenclatura establecida para algunos ejemplos de compuestos halón. Las fuentes antropogénicas de contaminación son bastante diversas en función del tipo de compuesto; por ejemplo, el bromuro de metilo (Halón 1001) se utiliza como pesticida lo que aporta también a la contaminación del sueño. El tribromometano (Halón 1003) es un subproducto utilizado como desinfectante en la potabilización del agua. Por otro lado, el bromotrifluorometano (Halón 1301) se introdujo como agente extintor de gas licuado a alta presión (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, n.d.). Mientras que, el bromoclorodifluorometano (Halón 1211), se usó principalmente como agente extintor, debido a su carácter dieléctrico, lo que genera que no exista daños al momento de aplicarlos sobre equipos electrónicos.

Finalmente, el diclorodifluorometano (Halón 122) se usó como gas refrigerante, propelente⁶ de aerosoles y en plásticos. Se usa principalmente como agente extintor, debido a su carácter dieléctrico (no provoca daños en los equipos electrónicos).

Tabla III-5 Ejemplo de algunos compuestos halón.

Nombre	Estructura	Nomenclatura Halón
Bromuro de metilo		Halón 1001
Bromoclorodifluorometano		Halón 1211
Bromotrifluorometano		Halón 1301
Diclorodifluorometano		Halón 122

Entre los halones, destacan el bromotrifluorometano (Halón 1301) y el bromoclorodifluorometano (Halón 1211), ya que ambos poseen los potenciales más elevados de destrucción de ozono.

⁶ Gas cuya energía potencial se transforma en energía cinética al dispersar o atomizar un producto contenido en un envase de aerosol.

f. Clorofluorocarburos (CFC)

Los clorofluorocarburos (CFC) son sustancias derivadas de los hidrocarburos saturados obtenidos mediante la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de cloro y flúor. Estas sustancias no son productos naturales, por esta razón su degradación es muy difícil y su presencia en la atmósfera se prolonga durante años; entre 50 a 100 años.

En la Tabla III-6 se muestra el tiempo de vida atmosférica de algunos compuestos principales que aportan en el agotamiento de la capa de ozono; así como, su respectivo Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO).

El PAO se refiere a la habilidad de las sustancias controladas para disminuir la capa de ozono. Es un factor establecido por el Protocolo de Montreal que estandariza todas las sustancias controladas en función de su potencial de agotamiento de la capa de ozono. Este índice toma en cuenta la estabilidad, tasa de difusión, cantidad de átomos destructores por molécula y el efecto de la radiación UV. A cada sustancia se le asigna un PAO relativo al CFC-11, cuyo PAO por definición tiene el valor 1 (SEMARNAT, 2021).

De los compuestos que se muestran en la Tabla III-6, se puede confirmar lo mencionado anteriormente: los HCFC tienen una vida atmosférica menor a los CFC, de la misma forma, el valor de PAO llega a ser hasta 10 veces menor al valor establecido como referencia. En particular, el CFC-12 llega a durar en la estratosfera hasta 100 años; mientras que, los compuestos HCFC, pueden durar desde un año o menos, hasta un máximo de 26 años. Por otro lado, los compuestos halón, al contener átomos de Br en su estructura tienen mayor capacidad de degradación de ozono, llegando a tener un PAO mayor a los CFC. Respecto a su vida atmosférica, ésta varía dependiendo el compuesto del que se trate. Finalmente, el CCl_4 aun considerando que el tiempo de vida atmosférica es menor que los CFC y con un PAO semejante, es regulado por el Protocolo de Montreal debido a su alta toxicidad.

Tabla III-6 Tiempo de vida atmosférica y PAO de algunos compuestos halogenados.

Compuesto	Vida atmosférica (Años)⁷	PAO
CFC-12	100	1
CFC-113	85	0.8
CFC-11	45	1
HCFC	1-26	0.02-0.12
Halón-1301	65	12
Halón-1211	16	6
Tetracloruro de carbono	26	1.1

Fuente: "Veinte Preguntas y Respuestas sobre la Capa de Ozono". Disponible en <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31180/20PreguntasdeOzono.pdf>

El primer CFC, económicamente importante, fue el diclorodifluorometano (CCl₂F₂), que se comenzó a utilizar en 1930 como un refrigerante mucho menos tóxico que el dióxido de azufre, el amoníaco o el clorometano, que eran los refrigerantes utilizados en aquella época. Los fluorocarburos, tradicionalmente, se han utilizado como refrigerantes, propulsores para aerosoles, disolventes, agentes expulsores para espumas extintoras de incendios y productos químicos intermedios de polímeros.

En particular, el triclorofluorometano y el diclorofluorometano se utilizaban antiguamente como propulsores para aerosoles. Por su parte, el triclorofluorometano se utiliza, hoy en día, como agente limpiador y desengrasante, como refrigerante y como agente expulsor para poliuretanos. También se utiliza en extintores de incendios, aislamientos eléctricos y como fluido dieléctrico. En el caso del diclorofluorometano, éste se utiliza en la fabricación de botellas de vidrio, líquidos intercambiadores de calor, refrigerante para máquinas centrífugas, disolvente o agente espumante.

⁷ El tiempo insumido para eliminar o convertir el 60% de un gas se denomina "vida atmosférica". Definición obtenida de: <https://propysol.com.mx/Los%20Propelentes%20y%20el%20Medio%20Ambiente.pdf>

El tetrafluoruro de carbono es un propulsor para cohetes y para el guiado de satélites. Mientras que, el tetrafluoretileno se utiliza en la preparación de propulsores para aerosoles alimentarios (Consejo de Salud Ocupacional, 2002).

4. Clorofluorocarburos

Son gases inertes que no reaccionan con los tejidos animales ni vegetales; sin embargo, se degradan combinándose con el ozono estratosférico en condiciones de frío y luminosidad.

Para identificar las diferentes especies que existen, se ha generado una forma de nomenclatura, la cual inicia por las letras “CFC”, indicando el tipo de compuesto (clorofluorocarburo), seguido de una combinación de números para indicar la cantidad de átomos de C, H y F, generando la estructura “CFC-XYZ”, donde:

X: número de átomos de C – 1

Y: número de átomos de H + 1

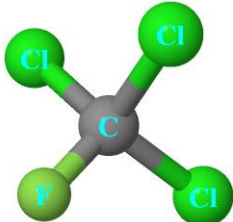
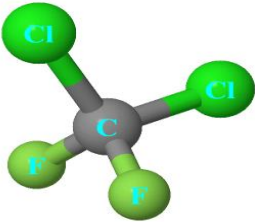
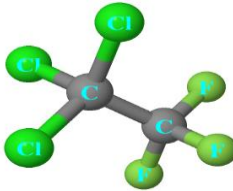
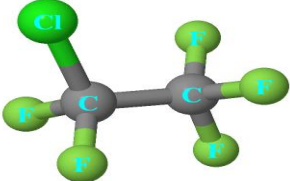
Z: número de átomos de F

Si la molécula de CFC contiene sólo un átomo de C, el primer número se omite quedando una clave de dos dígitos. Mientras que, para el átomo de Cl, a pesar de que no esté implícito en la clave, se determina por los números de átomos restantes para cada C. Se puede seguir la ecuación:

$$Cl = 5 + 2X - (Y + Z)$$

En la Tabla III-7, se encuentra la estructura, nombre y la nomenclatura establecida para algunos CFC.

Tabla III-7 Ejemplos de algunos clorofluorocarburos.

Nombre	Estructura	Clave
Triclorofluorometano		CFC-11
Diclorodifluorometano		CFC-12
Triclorotrifluoroetano		CFC-113
Cloropentafluoretano		CFC-115

Estos compuestos fueron producidos comercialmente desde la década de los años 30 por Thomas Midgley, principalmente usados para refrigeración y otras aplicaciones industriales. Estos compuestos son considerados la primera generación de gases refrigerantes. El primero en liberarse a la atmósfera fue el CFC-12 (CCl_2F_2), en 1930. Posteriormente, desde 1936 se produjo el CFC-11 (CCl_3F), y finalmente, desde 1944, el CFC-113 ($\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$). La concentración de CFC en la atmósfera se incrementó de manera muy notable desde los años 50 (Martín-Loeches Garrido et al., 2015).

Hacia los años 60, sus aplicaciones se habían ampliado, desde la industria de envases de aerosol de pinturas, pesticidas y desodorantes, también, se extendieron a la fabricación de espumas y plásticos, la fabricación de disolventes y limpiadores de componentes electrónicos. Hacia los años 70, el mundo estaba lanzando casi un millón de toneladas de CFC al año a la atmósfera (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2021).

Es importante mencionar que, ni el CFC-12, ni el CFC-113, son compuestos muy solubles en agua y, por tanto, no se eliminan por la lluvia en la troposfera (Molina & Rowland, 1974).

a. Descubrimiento del daño ocasionado

La presencia de hidrocarburos halogenados en la troposfera fue informada por primera vez por Lovelock et. al. en 1971 en la revista Nature. En este trabajo se diseñó la forma, mediante una cromatografía de gases, para detectar la presencia y distribución de los compuestos yoduro de metilo y CCl_4 en la atmósfera. Mediante un estudio relacionado a las corrientes y movimiento de las masas de aire en todo el mundo, se obtuvieron lecturas que, también indicaron la presencia de otro compuesto, el CCl_3F , en todas las muestras de dicho análisis (Lovelock et al., 1973).

La inercia química de los CFC, les permite residir durante decenas a cientos de años en la atmósfera (Kim et al., 2011). Por ello, es importante reconocer las investigaciones científicas realizadas por el mexicano Mario Molina⁸, quien, a

⁸ El Dr. José Mario Molina-Pasquel y Henríquez, nacido en la Ciudad de México en 1943, fue un ingeniero químico mexicano egresado de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde fue condecorado como doctor honoris causa desde 1996. Históricamente, es el tercer mexicano egresado de la UNAM en recibir el Premio Nobel. A lo largo de su trayectoria, recibió un total de 105 premios, condecoraciones y reconocimientos, entre ellos, se encuentran 39 doctorados honoris causa. Asimismo, fue miembro de 70 academias científicas, asociaciones de profesionistas, colegios, consejos y comités. Como parte de las actividades que realizó en el medio profesional, se desempeñó como profesor e investigador en ocho de las más prestigiadas universidades e institutos del mundo, entre ellas, se encuentra la UNAM y el Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Como homenaje a sus aportaciones científicas y a su brillante y destacada trayectoria académica, la Facultad de Química de la UNAM, se inauguró en 2015, el edificio "Mario Molina" en Ciudad Universitaria. Un espacio que vincula la investigación entre esa entidad académica y la industria, realizando investigaciones relacionadas con el medio ambiente y el cambio climático.

mediados de los años 70, descubrió junto con los investigadores Frank Sherwood Rowland y Paul Crutzen, que la liberación de ciertos gases industriales, como lo son los CFC, causaban el adelgazamiento de la capa de ozono en la estratosfera. Esto es relevante, ya que esta capa es la encargada de proteger a la Tierra de los rayos UV del sol.⁹ Debido a la relevancia de esta investigación, este trabajo fue reconocido con el Premio Nobel de Química en 1995 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021) .

La inercia y la alta volatilidad que hacen que estos compuestos sean aptos para el uso tecnológico, también hacen que, permanezcan en la atmósfera durante mucho tiempo. La reacción que presentan es a altitudes entre 20 y 40 km (Molina & Rowland, 1974), ubicándose en la estratosfera, zona donde se encuentra la capa de ozono, que cubre y protege de la radiación solar a la Tierra.

b. Síntesis y usos

Desarrollados por primera vez a principios de la década de 1930, los CFC se utilizaron ampliamente, tanto en, aplicaciones domésticas como industriales debido a sus propiedades únicas: baja toxicidad, inflamabilidad baja o nula, conductividad térmica de fase gaseosa baja, buena estabilidad química, baja corrosividad durante el uso, costo razonable, etc. (Kim et al., 2011).

Históricamente, el CFC-11 se utilizó en mezclas de aerosoles propulsores, aunque sus funciones han sido reemplazadas gradualmente por otros compuestos con un daño menor. Su principal reemplazo fue el HCFC-141b, desde 1990. Por su parte, el CFC-12 se desarrolló como refrigerante en la década de 1930, también se usó con frecuencia como propulsor de aerosol. Además, otros CFC como el CFC-113, CFC-114 (C₂Cl₂F₄) y CFC-115 (C₂ClF₅) se utilizan comúnmente en disolventes, propulsores y refrigerantes, respectivamente. Se prefiere el uso del CFC-11 en refrigerantes sobre el CFC-115; al igual que, el uso del CFC-11 o CFC-12 en propulsores en lugar del CFC-114. Además de los principales CFC mencionados

⁹ El nombre de la publicación es "Stratospheric sink for chlorofluoro methanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone" (Molina & Rowland, 1974).

anteriormente, el CCl_4 , una de las hepatotoxinas¹⁰ más potentes, se utilizó ampliamente en extintores, líquido de limpieza y fumigante de principios del siglo XX (Kim et al., 2011).

c. Efectos y daños a la capa de ozono

Para el año 1996, a una década de que el Protocolo de Montreal entrara en acciones, para mitigar el daño a la capa de ozono, se tomaron imágenes satelitales del planeta Tierra. En ellas se observó el tamaño del agujero de ozono localizado sobre la Antártida. En esta región del planeta, la concentración del monóxido de cloro (ClO) llega hasta los 1500 ppt (partes por trillón) durante el invierno antártico, que ocurre de junio a agosto en cada año. En la Ilustración III-15 se observa la dimensión del daño y la expansión que llegó a tenerse durante el tiempo del monitoreo.

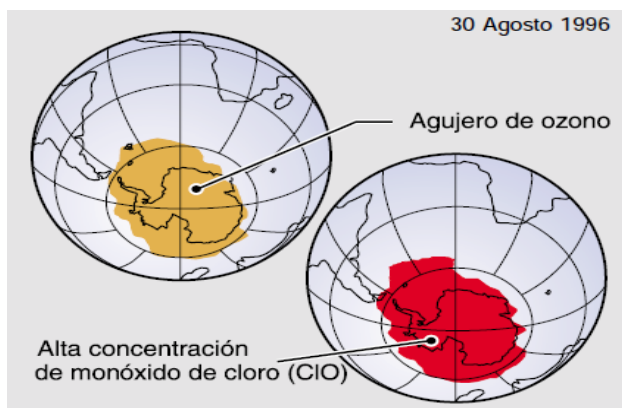


Ilustración III-15 Observaciones satelitales sobre la Antártida en 1996.

Durante el invierno antártico, la concentración de ClO aumenta a niveles alarmantes en la parte baja de la estratosfera, donde se acumula con otros gases como el ácido nítrico y sulfúrico; así como, el agua que comienza a formar pequeños cristales. A temperaturas por debajo de $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$, comienza la formación de nubes estratosféricas polares (NEP), que pueden mantenerse durante varias semanas o incluso meses. Dichas nubes se pueden generar en ambos polos; sin embargo, la

¹⁰ Sustancias capaces de dañar a los hepatocitos, quienes son los encargados de realizar la mayoría de las funciones del hígado. (Diccionario médico de la Clínica Universidad de Navarra, España).

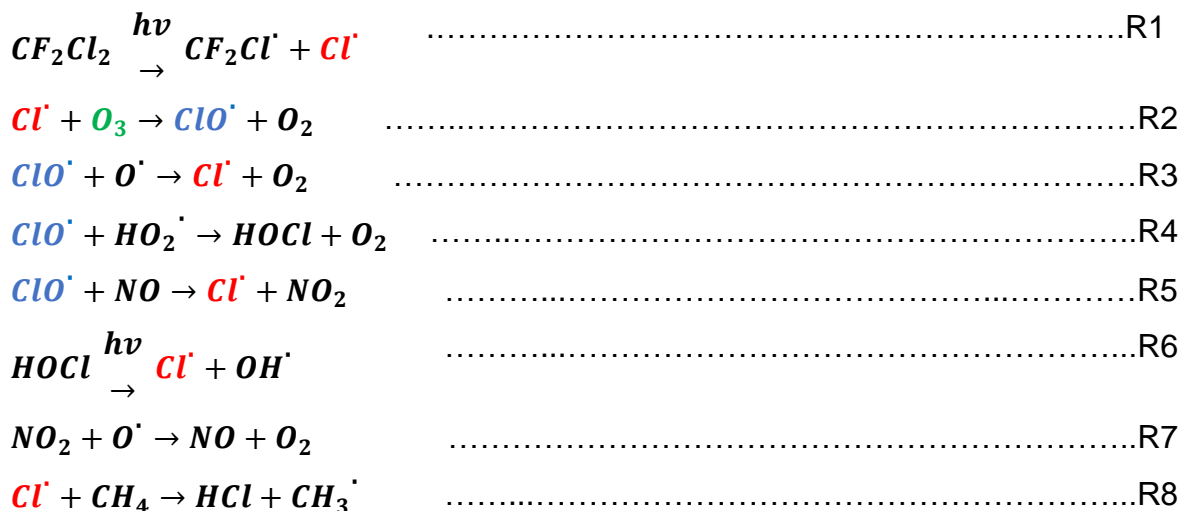
temperatura que se alcanza en la Antártida es menor, por lo cual, es más común que se generen y duren más tiempo en el polo sur.

La acumulación de CFC durante los inviernos en las NEP se lleva a cabo durante el invierno, ya que se genera un aislamiento causado por importantes movimientos de aire alrededor de los polos, reduciendo el movimiento hacia afuera o dentro de las nubes. Las NEP mantienen este estado hasta que termina el invierno y comienza la primavera, donde los rayos y la radiación solar aumenta significativamente, dando pie a que los ciclos catalíticos del Cl y Br originen la destrucción del ozono. En este mismo periodo, el aislamiento de las nubes baja y comienza a extender el área de afectación. Se ha detectado mediante lecturas, que durante el periodo invierno/primavera es cuando el adelgazamiento de la capa de ozono se hace más notorio.

d. Reacciones involucradas

Como se ha indicado anteriormente, los CFC, tienen características muy particulares que los hacen funcionales para algunos trabajos: alta estabilidad química, baja toxicidad, viscosidad, tensión superficial, así como, bajos puntos de ebullición. Sin embargo, al ser liberados a la atmósfera, una vez llegando a la estratosfera, es que se vuelven compuestos peligrosos para la vida en el planeta Tierra (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2021).

En específico, el daño que generan los CFC es debido a la liberación principalmente de cloro atómico (Cl^\cdot), radical generado por una reacción fotoquímica que ocurre en la estratosfera. Esta reacción de iniciación está representada en R1, donde un átomo de Cl^\cdot es altamente reactivo con el ozono, generando un ciclo de destrucción del ozono y regeneración del radical cloro. Los mecanismos de reacción de destrucción por Cl^\cdot , en la estratosfera, pueden ser ciclos catalíticos establecidos entre las reacciones R2 y R3, que son consideradas como reacciones de propagación del mecanismo. Así, la destrucción catalítica del ozono a partir del CFC-11 (CFCl_3) o el CFC-12 (CF_2Cl_2) se puede resumir con las siguientes reacciones en cadena:



En la ecuación R1 se muestra la reacción de fotólisis generada por radiación electromagnética entre 200 y 320 nm, disociando una molécula de CFC para generar a los radicales: clorodifluorometil ($CF_2Cl\cdot$) y cloro ($Cl\cdot$). Posteriormente, este segundo compuesto reaccionará, de acuerdo con la ecuación R2, con una molécula de ozono (O_3), destruyéndola y formando el radical monóxido de cloro ($ClO\cdot$) y oxígeno molecular (O_2).

La reacción donde se destruyen las moléculas de O_3 (R2) es tan rápida que la relación $[ClO\cdot]/[Cl\cdot]$ suele ser mayor a 10, indicando el desplazamiento de la reacción a productos, a través de la total destrucción del ozono. En tanto, en las reacciones R3 y R5, también se produce el radical $Cl\cdot$, lo que conlleva a que éste se regenere rápidamente para reaccionar, a través de las reacciones R2 y R8. Esta última reacción es clasificada como una reacción de terminación para el radical $Cl\cdot$, ya que al reaccionar con una molécula de metano (CH_4) se produce cloruro de hidrógeno (HCl) y un radical metilo ($CH_3\cdot$), terminando con el ciclo catalítico del $ClO\cdot$.

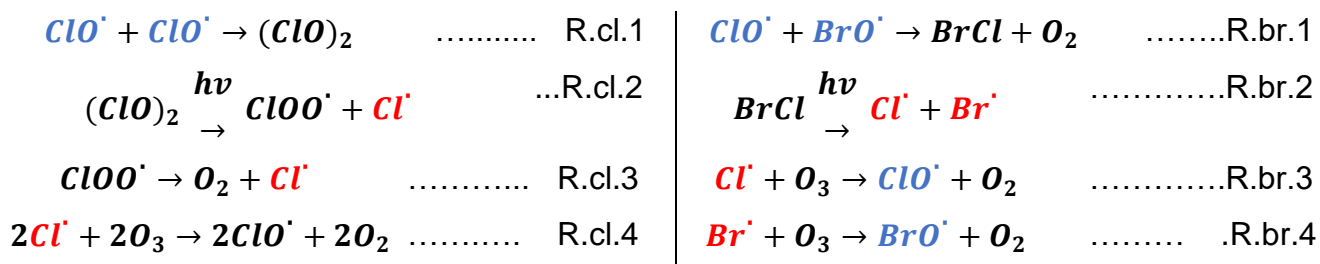
A su vez, el radical monóxido de cloro puede reaccionar con oxígeno atómico ($O\cdot$ en R3) o con monóxido de nitrógeno (NO en R5), liberando otro radical cloro, en cada reacción, que regresa el ciclo catalítico a la R2, donde el ozono es

destruido. Otra posibilidad es la R5, donde el radical ClO^\bullet reaccione con el radical peroxilo (HO_2^\bullet), generando O_2 y una molécula de ácido hipocloroso (HOCl). Posteriormente, este ácido se disocia por fotólisis en R6, liberando otros radicales cloro e hidroxilo (OH^\bullet).

A su vez, la reacción fotolítica inicial produce un radical de Cl^\bullet (R1) de cada una de las moléculas originales, más un radical CX_3^\bullet (donde X puede ser F^\bullet o Cl^\bullet). La química detallada de los radicales CX_3^\bullet en O_2 no se conoce completamente, pero en el laboratorio se produce rápidamente, donde una molécula de tipo fosgeno, CX_2O , y otro átomo de X probablemente Cl^\bullet (o ClO^\bullet) que se libera a partir del CFCl_2^\bullet o el $\text{CF}_2\text{Cl}^\bullet$. Por otro lado, las moléculas de CX_2O también se pueden fotolizar en la atmósfera para dar lugar a un tercer y cuarto átomo de halógeno libre. Por tanto, cada molécula de CFCl_3 , inicialmente fotolizada, probablemente conduce a dos o tres cadenas de átomos de Cl^\bullet ; mientras que, el CF_2Cl_2 probablemente produce dos cadenas de átomos de Cl^\bullet , cuando éste se fotoliza (Molina & Rowland, 1974).

También se sabe que, en regiones polares, la destrucción del ozono es mayor por la alta presencia del radical ClO^\bullet . Por otro lado, en estas regiones también se encuentran compuestos bromados, se generan las reacciones R1 y R2 análogas, en presencia de BrO^\bullet . Posteriormente, la reacción de este radical de bromo en combinación con el radical ClO^\bullet , generan otra vía para la degradación del ozono, como se muestra a continuación (Fahey, 2002).

Ciclo catalizador para la destrucción de ozono con ClO^\bullet y BrO^\bullet



Como producto de R2, se genera el radical monóxido de cloro (ClO^\bullet). Mismo que tiene un ciclo catalítico propio, donde reacciona con otro átomo igual (R.cl.1) para generar peróxido de cloro, $(\text{ClO})_2$, el cual, se descompone por la luz solar (R.cl.2), generando por otra vía, un nuevo átomo de Cl^\bullet y el radical ClOO^\bullet . Este último compuesto, de forma inmediata, se descompone y genera un segundo átomo de Cl^\bullet y uno de oxígeno molecular. Así, los dos átomos de Cl^\bullet , generados en las reacciones R.cl.2 y R.cl.3, reaccionan con dos moléculas de ozono para llevar a cabo una etapa de degradación, generando dos átomos de oxígeno y regenerando al radical ClO^\bullet , dejándolo así, disponible al radical ClO^\bullet para llevar a cabo un nuevo ciclo catalítico.

Como reacción competitiva, el radical ClO^\bullet reacciona con el radical monóxido de bromo (BrO^\bullet) para generar cloruro de bromo (BrCl en R.br.1), mismo que, se descompone fotoquímicamente para liberar radicales de Cl^\bullet y Br^\bullet (R.br.2). Posteriormente, cada radical reaccionan de forma directa con una molécula de ozono (R.br.3 y R.br.4), regenerando las moléculas iniciales del ciclo (ClO^\bullet y BrO^\bullet) y degradando, paralelamente, al ozono en oxígeno.

La presencia de luz solar para las reacciones R1, R.cl.2 y R.br.2, es de vital importancia, ya que da inicio a los ciclos de reacción que derivan de forma directa a la reducción de ozono en la estratosfera, por lo cual, la mayor actividad de

degradación ocurre en horas de luz diurna (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2021).

En condiciones típicas de la estratosfera en latitudes medias y bajas, un sólo átomo de cloro puede destruir cientos de moléculas de ozono, antes de que reaccione con otra sustancia para romper el ciclo catalítico.

IV. Legislación y tratados internacionales

1. Historia

Tras las sospechas de que la capa de ozono estaba siendo alarmantemente consumida por los CFC liberados a la atmósfera y con la participación total de 28 países, el 22 de marzo de 1985, se firmó el Convenio de Viena. En él, los participantes, mediante observaciones sistemáticas generaron un mecanismo de cooperación, investigación, acordando compartir información; así como, medir las cantidades de producción y las emisiones de las SAO.

Posterior a la firma del Convenio de Viena, la comunidad científica se dedicó a hacer numerosos estudios para determinar y evidenciar las sospechas sobre el adelgazamiento de la capa de ozono. En mayo de 1985, científicos británicos publicaron las conclusiones de la "Expedición Británica a la Antártida", dirigida por Dr. Joe Farman. Documento conocido por adaptar el término "agujero en la capa de ozono", donde se reveló por primera vez la disminución de la concentración de ozono sobre la Antártida en la primavera. Los resultados del documento se vieron confirmados mediante observaciones satelitales que ofrecieron la primera prueba de agotamiento grave, estableciendo una mayor urgencia a la necesidad de adoptar medidas concretas para reducir el daño causado.

Por otro lado, la Conferencia de Viena también adoptó una resolución en la que se facultaba al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) a convocar negociaciones para la elaboración próxima de un protocolo del convenio, que incluyera medidas de control para las SAO. En consecuencia, el 16 de septiembre de 1987, se firmó el Protocolo de Montreal (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial, 2000), el cual estableció acciones y fechas para la eliminación progresiva de producción de los CFC como principales SAO.

2. Convenio de Viena

La firma del convenio se mantuvo abierta a la firma de los estados y las organizaciones de integración económica regional en el Ministerio Federal de Relaciones Exteriores de la República de Austria, en Viena, del 22 de marzo al 21 de septiembre del 1985, y en la Sede de las Naciones Unidas, en Nueva York, del 22 de septiembre del mismo año al 21 de marzo de 1986.

El acuerdo al que se llegó cuando los países interesados firmaron el Convenio de Viena, estableció como obligaciones generales y en medida de sus posibilidades los siguientes puntos:

- La cooperación mediante observaciones sistemáticas, investigación e intercambio de información, a fin de comprender y evaluar mejor los efectos de: (1) las actividades humanas sobre la capa de ozono y (2) los efectos que presentó la modificación de la capa de ozono sobre la salud humana y el medio ambiente.
- Adoptar las medidas legislativas o administrativas adecuadas y cooperar en la coordinación de las políticas apropiadas para controlar, limitar, reducir o prevenir las actividades humanas bajo su jurisdicción o control en el caso de que, se compruebe que estas actividades presentaron efectos adversos como resultado de la modificación o probable modificación de la capa de ozono.
- Cooperación en la formulación de medidas, procedimientos y normas para la aplicación de este Convenio, con apertura a la adopción de protocolos y anexos que sean necesarios accionar y aplicar.
- Trabajar en conjunto con los órganos internacionales competentes para la aplicación de este Convenio y de los protocolos en que sean Parte (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2006).

Así, se estableció una Secretaría que llevó el control organizacional de las reuniones, en las cuales se revisaron los resultados de las metas establecidas, como lo son: la divulgación de información recopilada y obtenida de cada país, el estado de la capa de ozono; así como, su modificación que ha presentado y los efectos que estos cambios puedan ocasionar, generando programas de investigación y observaciones sistemáticas, cooperación científica y tecnológica,

intercambio de información y transferencia de tecnología y conocimientos a nivel global. Además, de ser necesario, se anexaron enmiendas complementarias para aportar a la meta final: mitigar el daño y aportar para la regeneración de la capa de ozono.

Las observaciones sistemáticas, establecidas para el análisis del agotamiento de ozono, están basadas en el estudio de los procesos físicos y químicos de la atmósfera mediante la elaboración de modelos teóricos detallados (considerando procesos de radiación, químicos y dinámicos), estudios de laboratorio para determinar coeficientes cinéticos, mecanismos de reacción químicos y fotoquímicos en la troposfera y estratosfera, lecturas de concentración y flujos de gases sobre terrenos con área delimitada y el perfeccionamiento de los instrumentos de medición ya instalados en satélites ubicados en órbita. Con esta información se pretendió demostrar los efectos negativos a la salud humana, los efectos biológicos y la fotodegradación que contribuyen para el cambio de la columna de ozono en la estratosfera. De igual forma, se buscó estudiar los efectos de la emisión de ozono en la troposfera y su repercusión en los parámetros climáticos, como los son: la temperatura superficial terrestre y de los océanos, el intercambio de gases entre la troposfera y la estratosfera, entre otros más.

Las sustancias consideradas con potencial para generar modificaciones en las propiedades químicas y físicas del ozono y que fueron objeto de estudio del Convenio de Viena, están clasificadas en la Tabla IV-1. El grupo de gases compuestos de carbón desempeña una importante función directa en la fotoquímica de la troposfera y una función indirecta en la fotoquímica de la estratosfera, por tal motivo se implementaron medidas para mantener sus niveles controlados. Por su parte, las sustancias nitrogenadas (N_2O y NO_x), también son contempladas como contaminante de la estratosfera por las reacciones que participan en el proceso de degradación de la capa de ozono. Adicionalmente, el grupo con mayor número de compuestos, que contempla el Convenio de Viena, es el de las sustancias cloradas de forma parcial o totalmente sustituidas, ya que como se mencionó anteriormente, en la estratosfera y por reacción fotoquímica estos liberan átomos de cloro de forma directa y como subproducto generan ClO , que también, con radiación UV genera un

ciclo catalítico que destruye la capa de ozono, como se describió previamente en el subcapítulo 4d “Reacciones involucradas”.

Tabla IV-1 Sustancias de interés en el Convenio de Viena.

Compuestas de carbono	Monóxido de carbono (CO)	Dióxido de carbono (CO ₂)	Metano (CH ₄)
Sustancias nitrogenadas	Óxido Nitroso (N ₂ O)	Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	
Sustancias cloradas	Alcanos totalmente clorados (CCl ₄ , CFC-11, CFC-12, etc.)		
	Alcanos parcialmente clorados (CH ₃ Cl, CHF ₂ Cl, CH ₃ CCl ₃ , etc.)		
Sustancias bromadas	Alcanos totalmente halogenados (CF ₃ Br)		
	Estos gases son antropogénicos y sirven como fuente de BrO _x que actúa de un modo análogo a los ClO _x .		

Fuente: "Manual del Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono".

3. Protocolo de Montreal (1987)

El 16 de septiembre de 1987 se firmó el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021). La firma del protocolo se mantuvo abierta a los Estados y organizaciones de integración económica regional en Montreal, el día 16 de septiembre de 1987; en Ottawa, del 17 de septiembre de 1987 al 16 de enero de 1988; y en la Sede de las Naciones Unidas en Nueva York, del 17 de enero de 1988 al 15 de septiembre del mismo año (Secretaría del Ozono, 2020). Este protocolo es considerado como el primer acuerdo internacional para proteger el ozono estratosférico de las SAO.

En el protocolo se estableció un plan para congelar la producción de CFC durante los próximos años, en comparación a los niveles reportados en 1986, y así reducir gradualmente su producción en un 50% durante la década de 1990. La producción de CFC antes de dicha regulación estaba dominada por el CFC-11 y el CFC-12 (Kim et al. 2011). A partir del año 1990, la liberación al ambiente ha disminuido considerablemente, ya que entró en acción el Protocolo de Montreal.

Asimismo, se han establecido diferentes calendarios de eliminación establecido para la producción de CFC (como CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, y CFC-115) y compuestos halogenados relacionados. En los países desarrollados, la eliminación de los CFC se había encomendado para el 1 de enero de 1996; mientras que, los países en desarrollo pueden seguir produciendo (y comprando) CFC y CCl₄.

El Protocolo de Montreal original controlaba sólo las emisiones de los CFC como SAO, en países desarrollados. Además, se estableció la eliminación gradual de los CFC en 1993, para así, lograr una reducción del 50% para 1998, en relación con los niveles de consumo reportados en 1986. Aunque los CFC fueron los únicos objetivos de control en el protocolo original, otras sustancias como los halones, CCl₄ y CH₃CCl₃ se agregaron en la Enmienda de Londres en 1990. Posteriormente, los HCFC y CH₃Br se agregaron como SAO en la Enmienda de Copenhague (1992) y la Enmienda de Montreal (1997), respectivamente. Así, en la Enmienda de Beijing en 1999, se incluyeron controles más estrictos sobre la producción y el comercio de HCFC y Halón-1011 (bromoclorometano). Debido a que los HCFC aún aportan cloro que puede contribuir al agotamiento del ozono estratosférico, con PAO distinto de cero, pero menor a los CFC, sus emisiones están programadas para ser eliminadas durante las próximas tres décadas (para el año 2030) (Kim et al., 2011).

En la Tabla IV-2, se observan los diferentes PAO establecidos en el Protocolo de Montreal en Enmienda del año 2000 para diferentes CFC y sus alternativas.

Tabla IV-2 Valor de PAO para diferentes flouocarburos.

Compuestos Halocarbonos	Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO)
CFC y CCl ₄	
CFC-11	1.0
CFC-12	1.0
CFC-113	0.8
CFC-114	1.0
CFC-115	0.6
CCl ₄	1.1

Compuestos Halocarbonos	Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO)
HCFC	
HCFC-22	0.055
HCFC-123	0.020
HCFC-124	0.022
HCFC-141b	0.110
HCFC-142b	0.065
HFC	
HFC-23	0
HFC-32	0
HFC-125	0
HFC-124a	0
HFC-143a	0
HFC-152a	0

Fuente: Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono Décima edición (2016)

En la Tabla IV-2 Valor de PAO para diferentes fluorocarburos. se puede observar que el PAO de los HCFC es bajo en comparación de los CFC; mientras que, para los HFC el PAO es tan bajo que se considera como cero, ya que no aportan a la liberación de átomos de Cl a la estratosfera.

Por su parte, Canadá, Estados Unidos y México, así como, los Estados Federados de Micronesia, presentaron propuestas en 2010 y 2011 para controlar el uso de HFC modificando el Protocolo de Montreal. Las propuestas y la declaración fueron motivadas por el interés en limitar el cambio climático de las futuras emisiones de HFC con alto GWP; sin embargo, no fueron aceptadas para ser consideradas en las modificaciones del Protocolo (Velders et al., 2012).

Durante el tiempo que se ha trabajado desde que se firmó el Protocolo de Montreal se han llevado a cabo muchas sesiones ordinarias, en las cuales se revisan los resultados, cumplimientos e incumplimientos de los calendarios de eliminación para las SAO; así como, las enmiendas futuras para hacer correcciones al Protocolo original y adaptarse a las condiciones específicas de cada momento.

4. Enmienda de Londres (1990)

Los acuerdos de la segunda reunión de las Partes en el Protocolo de Montreal, llevados a cabo en Londres del 27 al 29 de junio de 1990, entraron en vigor el 1º de enero de 1992. En ellos, se incluyó el control de diez compuestos CFC, el CCl₄ y el metilcloroformo; asimismo, se estipuló la supresión gradual de la producción y consumo de los dos primeros grupos de sustancias para el año 2000 y del tercero para el 2005. El Ajuste consistió en reducir cinco CFC, originalmente controlados, en un 50% en el año 1995 y eliminar los halones para el 2000.

En esta enmienda se destacó la creación de un mecanismo financiero, con el fin de proporcionar cooperación económica y técnica, incluyendo la transferencia de tecnología a los países en desarrollo, con el fin de que, éstos pudieran cumplir con los calendarios establecidos en el Protocolo (Sabogal, 1998).

5. Enmienda de Copenhague (1992)

Esta nueva enmienda se llevó a cabo en Copenhague, Dinamarca del 23 al 25 de noviembre de 1992, entrando en vigor el 1º de enero de 1994. En ella se incluyeron a los HCFC, los hidrobromofluorocarbonos (HBFC) y el metilbromuro en una lista de sustancias controladas. Adicionalmente, se estableció que la supresión gradual de los HCFC debería culminar para el año 2030; mientras que, la eliminación de los HBFC se estableció para 1996 y el congelamiento del metilbromuro se planeó para el año 1995. En esta reunión se reajustó el calendario, adelantando la supresión gradual de los halones para inicios de 1994 y la de todos los CFC, CCl₄ y el metilcloroformo para 1996 (Sabogal, 1998).

6. Ajustes de Viena (1995)

La 7ª Reunión de las Partes en el Protocolo de Montreal, celebrada en Viena, Austria, conmemoró el décimo aniversario de la firma del Convenio de Viena del 5 al 7 de diciembre de 1995. Aunque no se tiene mucha información de esta reunión en comparación con las enmiendas anteriores, se sabe que en ella se decidió eliminar las emisiones del metilbromuro en el año 2010, en los países desarrollados:

Bélgica, Canadá, Finlandia, Japón, Rumanía, Reino Unido, Irlanda y Estados Unidos de América, por mencionar algunos.

7. Enmienda de Montreal (1997)

La 9ª Reunión de las Partes en el Protocolo de Montreal se llevó a cabo en Montreal, Canadá, del 15 a 17 de septiembre de 1997, para celebrar el Décimo Aniversario del Protocolo, entrando en vigor el 1º de enero de 1999. Se estableció el Sistema de Licencias para la importación y exportación de sustancias controladas nuevas, usadas, recicladas y regeneradas, con el objeto de contribuir a la recopilación de información para la presentación de datos y apoyar a los países en la prevención del tráfico ilícito de sustancias controladas. De forma adicional, se estableció control sobre el comercio del metilbromuro con los estados que no son parte en el Protocolo. Además, se fijó un calendario claro para la reducción gradual del metilbromuro y su eliminación total para el año 2005, para los países desarrollados y en el año 2015, para los países en vías de desarrollo (Sabogal, 1998).

8. Enmienda de Beijing (1999)

La 11ª Reunión de las Partes en el Protocolo de Montreal se llevó a cabo en Beijing, China del 29 de noviembre a 3 de diciembre 1999, entrando en vigor el 1º de enero de 2001. En esta enmienda se incluyó al bromoclorometano como una sustancia controlada con un PAO de 0.12. Además, se introdujeron medidas de control para la producción y consumo de esta sustancia, controles de producción para los HCFC y se dispusieron requerimientos de reporte para el uso del metilbromuro en ciertas aplicaciones.

9. Enmienda de Kigali (2016)

La 28ª Reunión de las Partes en el Protocolo de Montreal se llevó a cabo en Kigali, Ruanda, del 10 al 15 de octubre del 2016. Esta enmienda entró en vigor el 1 de enero de 2019.

El acuerdo contempló que durante los próximos 30 años se reducirá en más de 80% la producción y consumo de HFC, ya que aunque tienen un valor de PAO bajo, casi considerable como cero, son peligrosos gases de efecto invernadero con un GWP que puede ser muchas veces mayor al del CO₂. La implementación de los objetivos establecidos en la enmienda se realizaría en tres fases: un grupo de países desarrollados iniciaría la eliminación gradual de HFC a partir de 2019. Mientras que, los países en vías de desarrollo alcanzarán una congelación de los niveles de consumo de HFC para 2024. Finalmente, un grupo menor de países congelará el consumo hasta 2028.

Si se implementa completamente la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, podrá evitar hasta 0.4 °C de calentamiento global para fines de este siglo. La visión de la enmienda está respaldada por la evidencia presentada en la última evaluación científica del agotamiento de la capa de ozono, mostrando que en partes de la capa de ozono se ha recuperado a una tasa de 1-3% por década desde el año 2000. Con respecto a las tasas proyectadas, se espera que en el hemisferio norte y en las zonas de latitud media, se recuperen completamente para la década de 2030, seguidos del hemisferio sur en la década de 2050 y las regiones polares hasta 2060 (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2019).

V. Resultados a nivel mundial

La aplicación del Protocolo de Montreal ha progresado bien en los países desarrollados y en vías de desarrollo. Los calendarios de eliminación en la mayoría de los casos se han respetado, algunos incluso antes de lo previsto. En vista del progreso constante realizado en el marco del Protocolo, ya en 2003, el ex secretario General Kofi Annan declaró: *"Tal vez, el acuerdo internacional más exitoso hasta la fecha ha sido el Protocolo de Montreal"* (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021) .

Lo reportado por el Experimento Avanzado de Gases Atmosféricos Globales (AGAGE por sus siglas en inglés) en su estudio de Aceptabilidad Ambiental de Fluorocarbonos Alternativos (AFEAS por sus siglas en inglés), indica la cantidad de compuestos liberados a la atmósfera en diferentes años a nivel global. En la Ilustración V-1, se detalla la cantidad de miles de toneladas liberadas de diferentes CFC, como lo son, CFC-11, CFC-12 y CFC-113. Se observa que para los compuestos CFC-11 y CFC-12, la liberación máxima ocurrió en 1974; mientras que, para el CFC-113, en el año 1986. Por otro lado, entre los años 1986 y 1988, se observa una clara baja en la liberación de dichos compuestos. En este periodo, para el CFC-113 se registraron tan sólo 2.1 mil toneladas liberadas, cantidad pequeña considerando que la liberación máxima alcanzó las 251.5 mil toneladas.

Estas reducciones cumplieron con la meta original establecida en el Protocolo de Montreal, la cual establecía reducir hasta el 50%, la liberación de CFC en la década de los 90, alcanzando la eliminación total en 2000-2010.

Liberación de CFC 11, 12 y 13

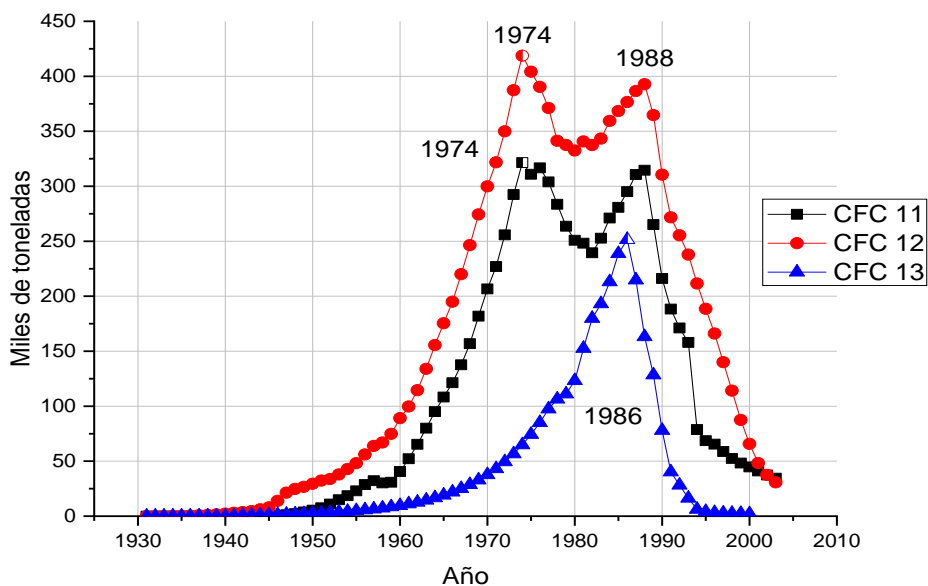


Ilustración V-1 Cantidad en toneladas de liberación para diferentes CFC.

Fuente: *Advanced Global Atmospheric Gases Experiment* el 13 de octubre 2021 consultado en <https://agage.mit.edu/data/afeas-data>

Para el caso de los HCFC, se observa en la Ilustración V-2 que a partir del año 1981 y 1991, hubo un incremento en la producción de estos compuestos, ya que se comenzaron a usar como variantes de los CFC. El HCFC registrado con más liberación en menos tiempo, es el HCFC-141b, alcanzando en el año 2002 las 67.66 mil de toneladas. Su mayor uso, es como agente de limpieza o agente espumante. La producción mundial total de HCFC ha estado dominada por el HCFC-22 para representar alrededor del 77% del presupuesto total hasta 2006. La lectura más alta registrada, en el año 2002, fue un total de 240.8 mil toneladas liberadas.

Recordando que, los HCFC fueron incluidos en la Enmienda de Copenhague que entró en vigor en 1994, se observa que, pasaron más de seis años en comenzar la reducción de liberación a la atmósfera, para posteriormente comenzar con su congelación.

Cantidad en toneladas de liberación para diferentes HCFC.

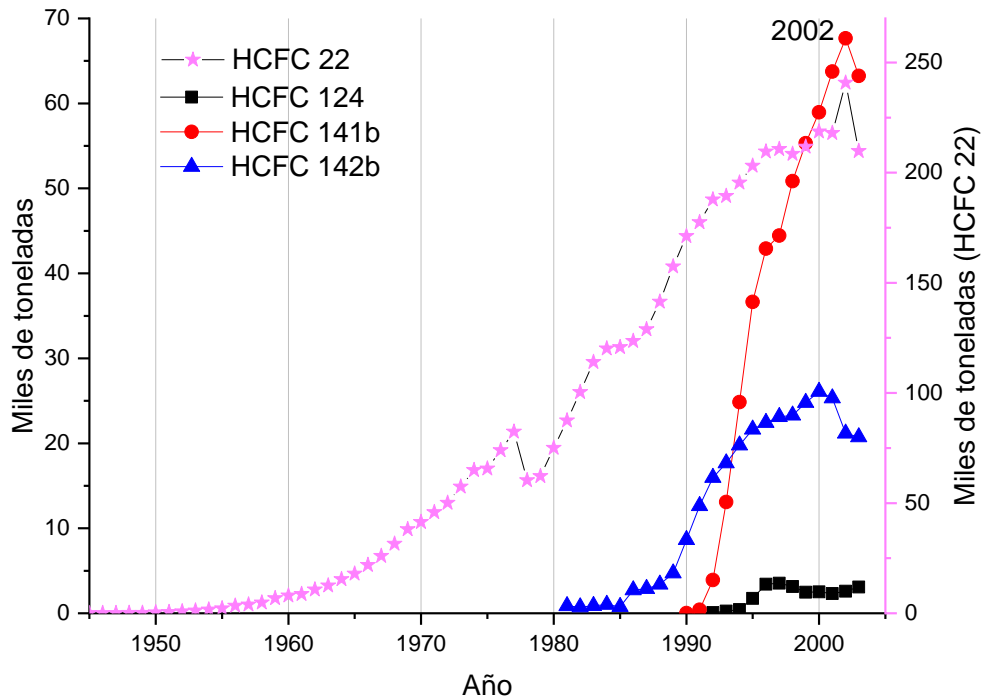


Ilustración V-2 Cantidad en toneladas de liberación para diferentes HCFC.

Fuente: Advanced Global Atmospheric Gases Experiment el 13 de octubre 2021 consultado en <https://agage.mit.edu/data/afeas-data>

Por su parte, la liberación de HFC-134a incrementó a inicios de los años de la década de los 90s, como alternativa de los CFC por tener un bajo PAO. Un estudio generado por el Experimento Avanzado de Gases Atmosféricos Globales (AGAGE, por sus siglas en inglés) patrocinado por el Área de Enfoque de Composición Atmosférica de la NASA, determinó la cantidad de HFC-134a liberada desde inicios de su producción hasta el 2003. Como se observa en la Ilustración V-3, la tendencia de crecimiento constante durante el tiempo que se monitoreó por el AGAGE, alcanzando en 2004 la liberación de aproximadamente 120 mil toneladas.

Cantidad en toneladas de liberación para HFC-134a

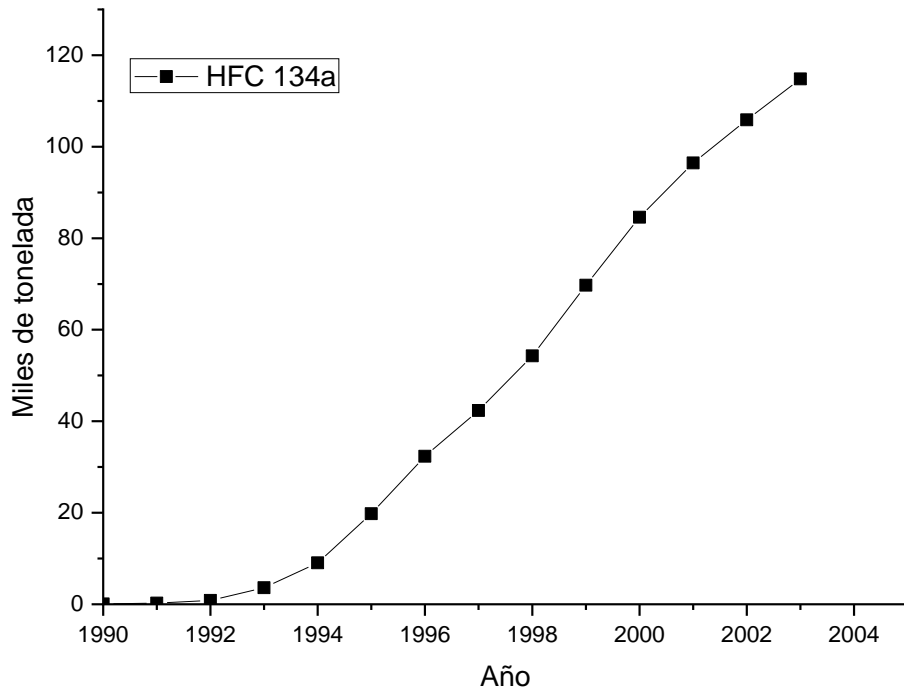


Ilustración V-3 Cantidad en toneladas de liberación para HFC-134a.

Fuente: <https://agage.mit.edu/>

De acuerdo con lo reportado por la Secretaría del Ozono, cuya sede se ubica en Nairobi, Kenia, dentro del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, el año con más consumo de HFC a nivel mundial fue en 2019, llegando a casi un billón de toneladas; sin embargo, gracias a la enmienda de Kigali, la cual entró en vigor en el mismo año, se observó una reducción casi por completo, ya que se registraron valores de 25,147 toneladas para el año 2021, representando sólo el 0.0025% respecto al consumo máximo de HFC reportado dos años antes. Estos resultados se hacen más notables en la Ilustración V-4.

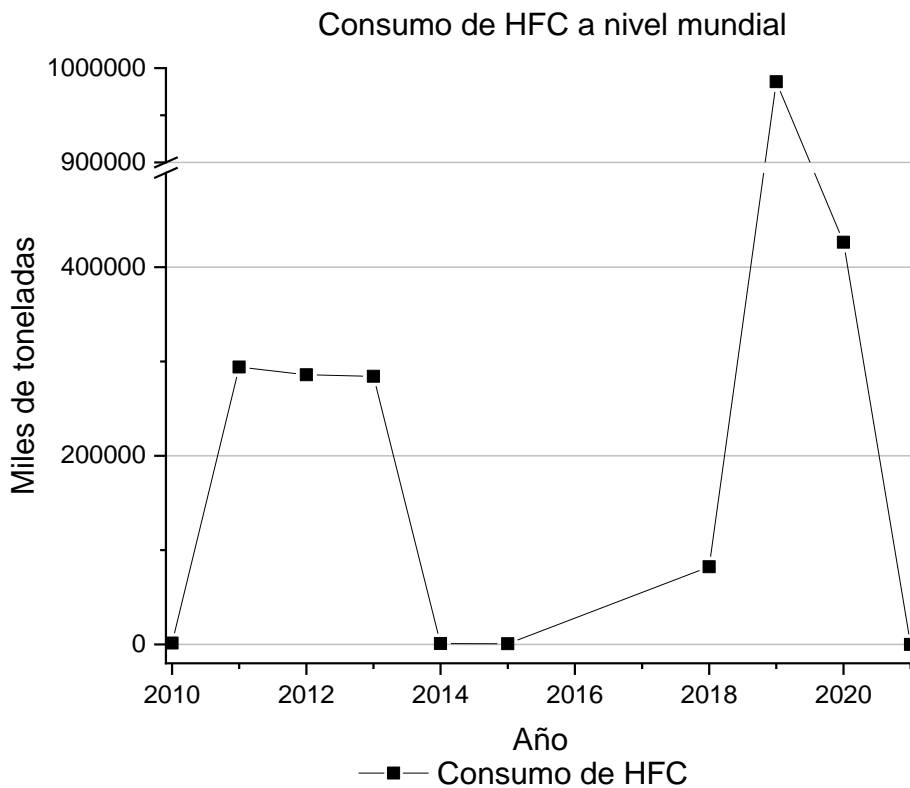


Ilustración V-4 Consumo de HFC a nivel mundial.

Fuente: <https://ozone.unep.org/>

La liberación de HFC-134a, el cual es usado como un refrigerante, tiene un aumento mayor y en menor tiempo que el HCFC-141b, como se puede notar en la Ilustración V-5. Éste alcanzó un máximo de 114.8 mil toneladas liberadas a mediados de la década del 2000, posicionándolo como el compuesto dominante de HFC. Además de este compuesto, en la década de los 90 y durante la primera década del 2000, se han investigado, desarrollado y usando otros HFC en lugar de sus contrapartes CFC (Kim et al., 2011).

Al comparar los datos de liberación para los compuestos CFC-12, HCFC-141b y HFC-134a en la Ilustración V-5, se observa que la cantidad de CFC-12 comenzó a disminuir de forma drástica a partir de 1990 y al mismo tiempo, comenzó a liberarse HCFC y HFC, debido a la preferencia de estos dos sobre el CFC-12 con bajo PAO, el cual se puede considerar como cero.

Comparación de cantidad liberada a la atmósfera de diferentes compuestos.

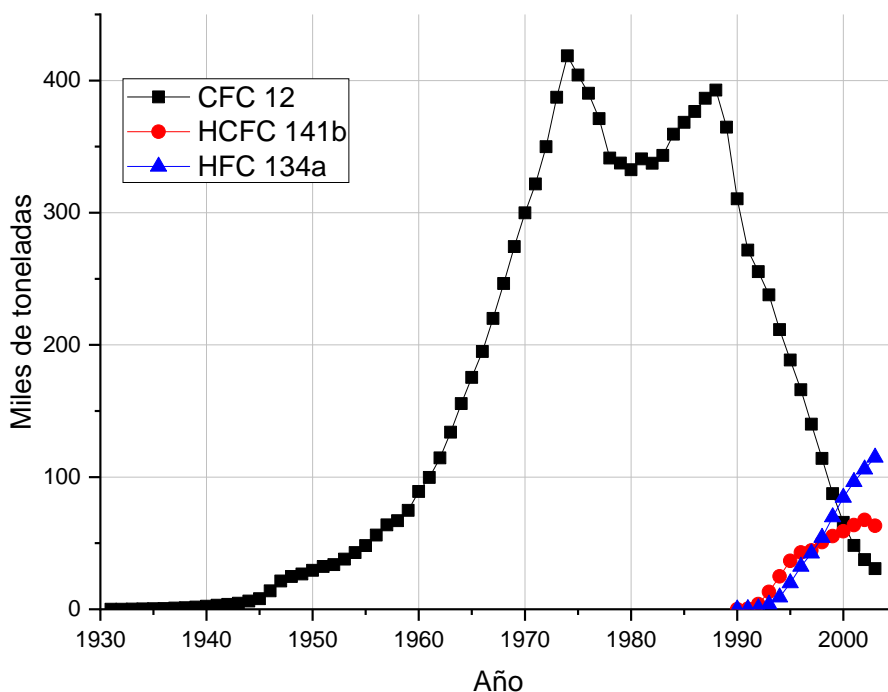


Ilustración V-5 Comparación de cantidad liberada a la atmósfera de diferentes compuestos.

Fuente: <https://ozone.unep.org/>

El coeficiente de correlación para la liberación de CFC-12 posterior al año 1988 es de la misma magnitud a el de HFC-134a, por lo cual, se puede considerar que con la misma rapidez con la que se redujo la liberación de CFC, se aumentó la cantidad de HFC en la atmósfera.

Debido a la aplicación rigurosa del Protocolo de Montreal, se observó una reducción drástica, tanto en la producción, como en la liberación de la mayoría de los CFC, en todo el mundo. Un ejemplo es Rusia, en donde los registros de producción y ventas de tres compuestos (CFC-11, CFC-12 y CFC-113) cayeron drásticamente desde finales de la década de 1980 hasta la de 1990, gracias a las acciones establecidas en este programa internacional (Kim et al., 2011).

En particular, se encontró que las emisiones de CFC-11 disminuyeron considerablemente, cuando cesó su consumo en la década de 1990, en los países desarrollados del mundo. De manera similar a los principales CFC, la concentración de CCl₄ disminuyó de 109.5 ppt (en 1990) a 101.0 ppt (en 1996), hasta que en la primera década de los 2000, llegaron al récord de 92.6 ppt en 2004 (Kim et al., 2011).

La mayoría de las SAO son también potentes GEI. Por lo tanto, las reducciones en las concentraciones atmosféricas de SAO, para proteger la capa de ozono, han tenido el beneficio adicional de brindar cierta protección climática (Velders et al., 2012).

Se estima que el ozono se ha recuperado en una tasa del 1-3% desde el año 2000. Con dicha rapidez, se estima que el ozono del hemisferio norte y de latitudes medias está programado por sanar completamente, en la década de 2030; seguido por el hemisferio sur en la década de 2050 y las regiones polares hasta la década de 2060 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

En el año 2018, científicos mostraron que hubo un aumento inesperado en las emisiones del CFC-11, provenientes de fuentes no declaradas. Se reaccionó rápidamente para tomar medidas colectivas e individuales para abordar el problema, incluida la solicitud del Panel de Evaluación Científica (SAP) y el Panel de Evaluación Tecnológica y Económica (TEAP) para investigar. Actualmente, los informes del año 2021 indican que la recuperación de la capa de ozono no se verá sustancialmente afectada por este aumento inesperado. Los últimos hallazgos destacados por SAP incluyeron que, el aumento inesperado en las emisiones globales del CFC-11 disminuyó en 2019, previendo que las cantidades atmosféricas del CFC-11 continúen disminuyendo, asegurando el cumplimiento de los calendarios establecidos por el Protocolo de Montreal. Finalmente, se espera que las emisiones inesperadas no hayan causado un retraso significativo en la recuperación de la capa de ozono (Secretaría del Ozono, 2021).

VI. Resultados en México

México fue de los primeros 28 países en ser parte del Convenio de Viena, de la misma forma, es de los 46 países en ratificar el Protocolo de Montreal, desde que se estableció en un inicio, el 31 de marzo de 1988. En poco más de 30 años, México, ha demostrado su liderazgo en la protección de la capa de ozono (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2021).

Como resultado de todas las medidas establecidas en el Protocolo de Montreal, al igual que el interés y esfuerzo por parte de las instituciones, gobiernos y empresas involucradas, el Consumo Ponderado Nacional de Sustancias Agotadoras de Ozono (CPONSAO), México ha presentado en gran medida una reducción significativa de emisiones. Prueba de ellos, se muestra en la Tabla VI-1, donde se observa el consumo ponderado a nivel nacional. Este valor sigue la siguiente ecuación de cálculo:

$$\textit{Consumo ponderado} = \textit{Producción} + \textit{importación} - \textit{exportación}$$

Con dicha ecuación, se pueden obtener valores negativos, cuando la cantidad de toneladas exportadas es mayor a los otros dos componentes. Este comportamiento se observa en los CFC desde el año 2006. En ese mismo año, fue la última vez que se reportó un valor para los compuestos halón, posterior a esa fecha, se ha mantenido en cero el consumo ponderado.

Aun considerando que los HFC son los compuestos encargados de desplazar a los HCFC; estos últimos, aún presentan valor de consumo en nuestro país. En específico, en el año 2020 se reportó el consumo de 156.47 toneladas.

Tabla VI-1 Consumo ponderado de sustancias agotadoras del ozono estratosférico en toneladas.

Año	CFC¹¹	HALONES¹²	HCFC¹³	CH₃Br	1,1,1-tricloroetano	TOTAL
1989	10,033.8	892.8	137.0	0.0	1.4	29,474.5
1990	12,041.2	2,769.6	126.5	0.0	0.0	21,488.9
1991	10,290.7	2,777.6	107.3	396.4	18.9	16,547.7
1992	8,512.8	1,690.2	318.0	778.4	11.5	11,913.7
1993	9,251.9	1,425.5	325.8	2,113.8	49.2	13,692.0
1994	9,654.6	1,122.0	392.6	3,252.6	16.3	14,438.1
1995	4,859.5	0.0	312.5	1,438.2	135.8	6,746.0
1996	4,858.8	89.1	347.0	750.0	122.6	6,167.5
1997	4,157.3	284.6	432.3	1,126.8	108.0	6,109.0
1998	3,482.9	212.8	473.7	1,207.4	76.4	5,640.7
1999	2,837.9	141.0	1,134.3	839.4	54.2	5,006.8
2000	3,059.5	230.4	1,848.6	867.0	38.6	6,044.1
2001	2,223.9	140.4	1,172.4	1,100.1	30.0	4,666.8
2002	1,943.7	147.3	792.3	1,067.5	0.0	3,951.6
2003	1,983.2	103.8	728.3	968.0	0.0	3,783.2

¹¹ CFC-11, CFC-12, CFC-13, CFC-113, CFC-114, CFC-115

¹² Halón-1211, Halón-1301

¹³ HCFC-22, HCFC-123, HCFC-124, HCFC-141b, HCFC-142b, HCFC-225

Año	CFC¹¹	HALONES¹²	HCFC¹³	CH₃Br	1,1,1-tricloroetano	TOTAL
2004	3,210.0	105.6	1,316.4	987.5	0.0	5,619.5
2005	1,624.0	52.8	1,185.1	891.1	0.0	3,842.5
2006	-441.3	51.6	1,285.9	722.6	0.0	1,619.0
2007	-480.6	0.0	1,441.2	894.6	0.1	1,934.5
2008	-131.8	0.0	1,214.8	819.9	0.0	1,990.9
2009	-102.3	0.0	1,125.6	745.4	0.0	1,768.8
2010	-240.8	0.0	1,168.6	667.9	0.0	1,595.8
2011	-8.0	0.0	1,083.5	488.2	0.0	1,563.8
2012	0.0	0.0	1,091.1	324.6	0.0	1,415.7
2013	0.0	0.0	791.3	327.4	0.0	1,118.7
2014	0.0	0.0	733.8	0.0	0.0	733.8
2015	-39.9	0.0	660.4	50.9	0.0	671.4
2016	-11.6	0.0	519.6	49.4	0.0	557.5
2017	0.0	0.0	414.2	0.0	0.0	414.3
2018	0.0	0.0	321.1	0.0	0.0	321.1
2019	0.0	0.0	234.6	0.0	0.0	234.7
2020	0.0	0.0	156.5	0.0	0.01	156.5

Fuente:

[http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE03_05&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE03_05&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=)

En la Ilustración VI-1, se observa que durante toda la década de los 90, se presentó una importante baja en el valor de consumo total de SAO. El valor reportado para el año 2020, ha sido el mínimo histórico, siendo de 156.53 toneladas. Este valor representa un importante resultado para México a nivel internacional, en relación con la eliminación de sustancias que amenazan a la capa de ozono.

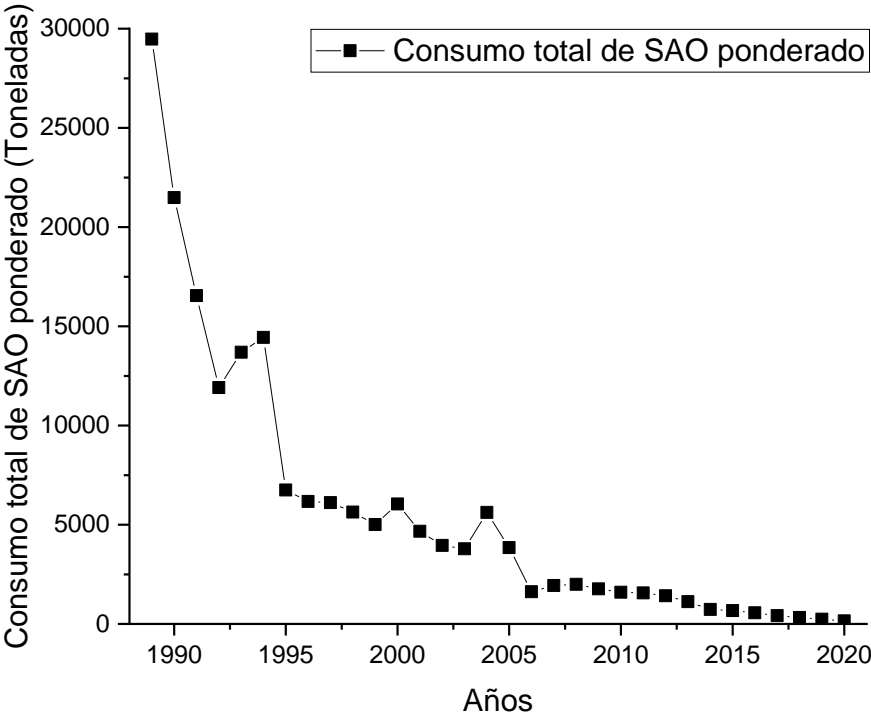


Ilustración VI-1 Consumo total ponderado para todas las SAO reportado por el Consumo Ponderado Nacional de Sustancias Agotadoras de Ozono.

También es clara la tendencia de decremento desde el año 1989 hasta el año 1994. En este periodo, el consumo se logró disminuir el 50%, cambiando de 29,474.5 a 14,438.1 ton. Años más tarde, para el valor reportado en el 2020, el consumo representa el 0.53%, con referente al valor máximo histórico.

Consumo ponderado de diferentes SAO reportado por el Consumo Ponderado Nacional de Sustancias Agotadoras de Ozono.

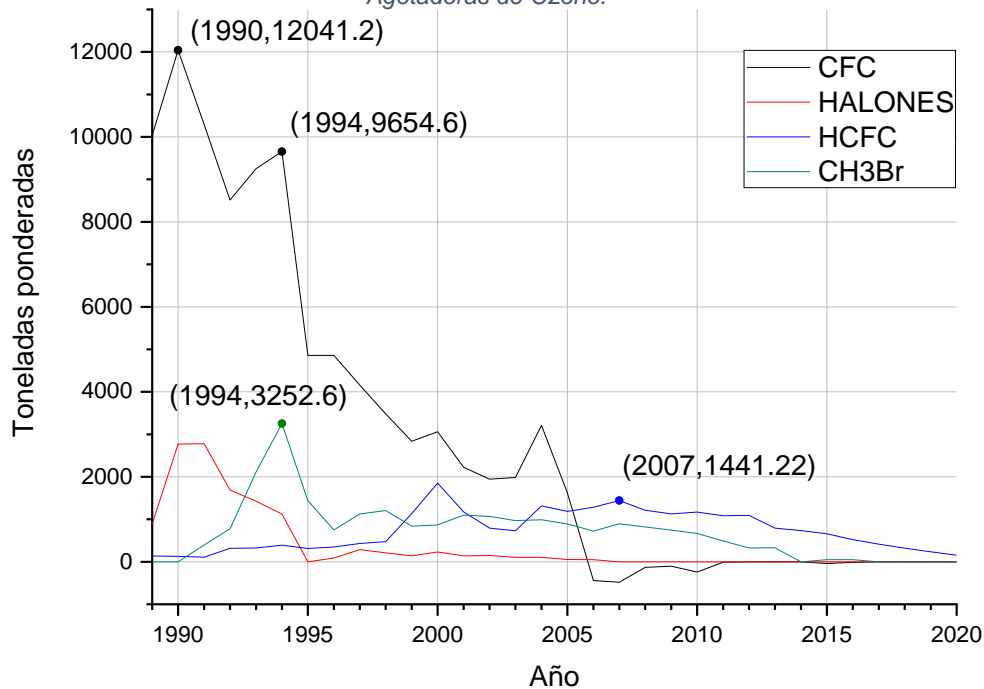


Ilustración VI-2 Consumo ponderado de diferentes SAO reportado por el Consumo Ponderado Nacional de Sustancias Agotadoras de Ozono.

Fuente:

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores21/conjuntob/indicador/01_atmosfera/1_3_2.html

Como se observa en la Ilustración VI-2, desde 1990, después que se detectó el daño que causaban los CFC y posterior al establecimiento del Protocolo de Montreal, los niveles de consumo ponderado en México se redujeron de manera significativa. En septiembre de 2005, México cerró su producción de CFC (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021). Debido a que, el mayor daño a la capa de ozono es generado por los CFC, todas las acciones tomadas para afrontar esta situación fueron enfocados a reducir los niveles de estos compuestos. Posterior a ese año; en el 2006, el valor de consumo ponderado se ha mantenido igual o menor a cero, situación prometedora, ya que este nivel libre de emisiones se ha mantenido hasta el año 2020.

En particular, el bromuro de metilo tuvo su consumo máximo en el año 1994; sin embargo, al conocer el daño que generaba el átomo de bromo en la atmósfera, éste se dejó de usar y comenzó su reducción de consumo hasta que, en el año 2017, el dato reportado fue de cero. Mientras que, para los compuestos halón, desde el 2007 ya se había alcanzado un consumo nulo.

Para los compuestos HCFC, a los cuales se les establecieron medidas de producción en La Enmienda de Beijing en el año 1999, se registró el consumo máximo durante el año 2000. Posteriormente su valor disminuyó, siendo en el año 2007, el último incremento de consumo registrado. Finalmente, para el año 2020, el valor reportado fue de 156.5 toneladas ponderadas.

Así, México ha demostrado su liderazgo en la protección a la capa de ozono y en el impulso de importantes enmiendas. Con las acciones realizadas durante 30 años, se han implementado más de 120 proyectos demostrativos, capacitación, asistencia técnica e inversión. Con ello, se ha eliminado el 98% del máximo nivel de consumo de las SAO, suprimiendo totalmente la liberación de los compuestos CFC, el CCl₄, los halones y el CH₃Br; así como, impulsando la destrucción de las SAO en desuso (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017).

Por otro lado, datos reportados por la Secretaría del ozono, indican que la producción de SAO en México ha sido reducida de forma dramática gracias a las acciones tomadas y aplicadas ante el interés de reducir y reparar los daños a la atmósfera generados, principalmente, por el uso de estas sustancias. En la Ilustración VI-3 se observa que entre los años 2005 y 2006, hubo una reducción de casi 10 veces la producción de SAO. Para el reporte generado en el año 2020, se logró disminuir hasta un 0.13% del valor máximo alcanzado durante 1995.

Comportamiento de la producción de SAO desde el año 1986 hasta el 2020 en México.

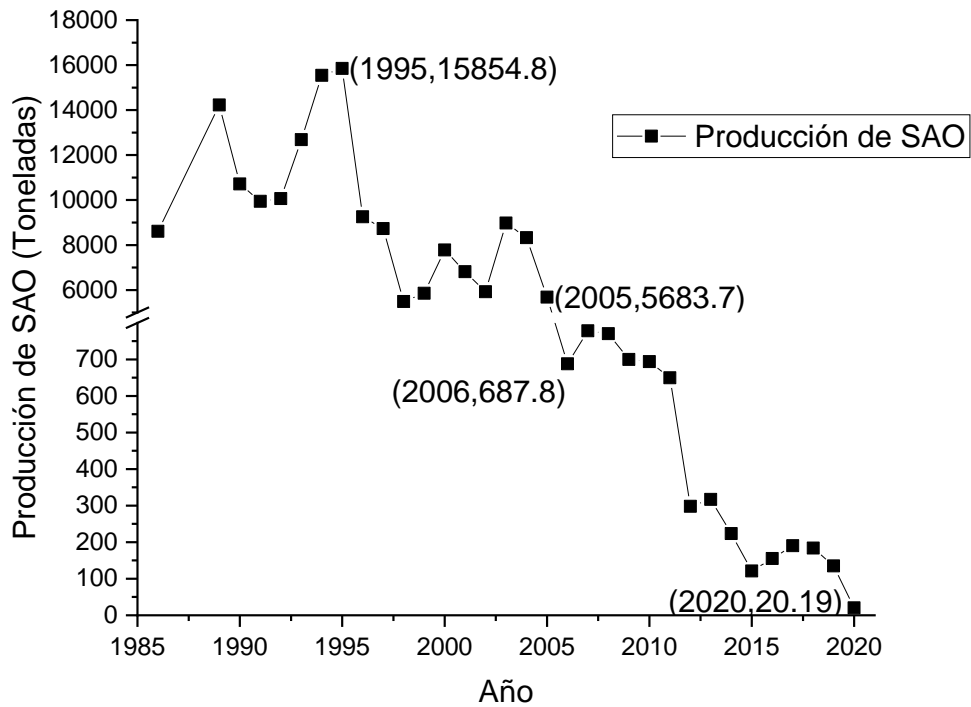


Ilustración VI-3 Comportamiento de la producción de SAO en México de 1986 a 2020.

Fuente: <https://ozone.unep.org/countries/profile/mex>

Por otro lado, la producción de los HCFC, también, ha sido reportada desde el año 1989 hasta 2020. En la Ilustración VI-4, se observa el comportamiento reportado. El año 2007 fue el año donde se reportó el valor máximo de producción para los HCFC, llegando a 778.3 toneladas. Para el año 2012, se registró un decremento de casi dos terceras partes del año anterior, cambiando de 649.7 toneladas en el 2011 a 298.32 toneladas en 2012. El último reporte generado para el año 2020, muestra que la producción reportada es de 20.2 toneladas, lo que representa el 2.6% del valor máximo alcanzado en el 2007.

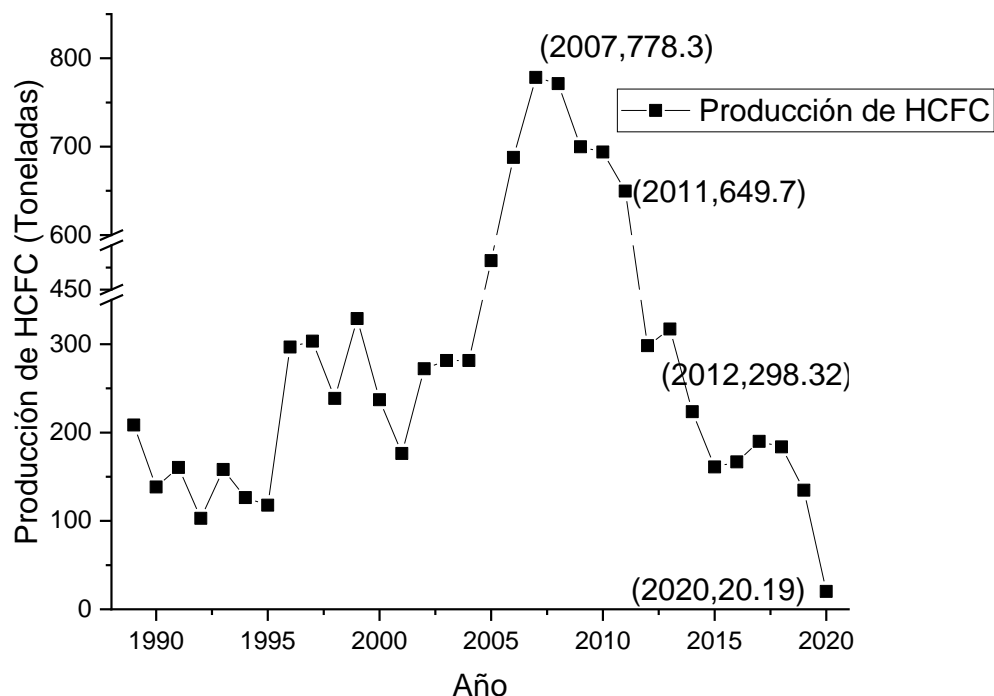


Ilustración VI-4 Comportamiento de producción de HCFC desde el año 1989 hasta el 2020 en México.

Fuente: <https://ozone.unep.org/countries/profile/mex>

En esta sección es importante mencionar que el Fondo Multilateral (FML), es el mecanismo financiero del Protocolo de Montreal que brinda asistencia financiera y técnica a los países en desarrollo, permitiéndoles cumplir con las medidas de control del Protocolo. El Comité Ejecutivo del FML aprobó a México, un financiamiento por el monto de US\$136,634,165, el 12 de marzo del 2021. Este monto es mayor, ya que al 31 de diciembre de 2019, se habían otorgado US\$127,376,972 a México (Secretaría del Ozono, 2020).

De esta forma, México cumplió puntualmente sus compromisos ante el Protocolo de Montreal, sustituyendo estas sustancias con alternativas ambientalmente limpias, con viabilidad técnica y económica, transfiriendo tecnología, equipamiento de punta, generando empleos especializados y mejor remunerados (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

VII. Alternativas de gases refrigerantes

En un esfuerzo por reducir los problemas ambientales asociados con los CFC, los reemplazos provisionales, mejor conocidos como HCFC, y posteriormente, los HFC, se han introducido en el campo de refrigerantes. Dichos reemplazos tienen átomos de hidrógeno agregados a la estructura del CFC, para evitar o minimizar el transporte de compuestos que contienen átomos de Cl a la estratosfera. Estas alternativas pueden compartir propiedades fisicoquímicas similares a las de los CFC, sin tener el gran impacto al ambiente. Tanto los HCFC como los HFC, se descomponen fácilmente en la atmósfera, lo que provoca que, tengan vidas atmosféricas mucho más cortas en comparación con los CFC y una contribución considerablemente reducida al agotamiento del ozono (Kim et al., 2011).

Además, se han iniciado acciones para sustituir el uso de los HFC, que si bien, no dañan la capa de ozono, cuentan con un alto GWP, por otros gases refrigerantes. El descubrimiento del daño colateral que genera la liberación de HFC fue lo que propició el establecimiento de la enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, vigente en México desde el 2019 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

Actualmente se están introduciendo varios HFC con una vida útil atmosférica muy breve para espumas y aerosoles; así como, acondicionadores de aire móviles. Además, el FML del Protocolo de Montreal está financiando diversos proyectos en países en vías desarrollo, con el fin de facilitar la transición de SAO a sustancias o métodos alternativos, con menor impacto negativo en el clima (Velders et al., 2012).

Hoy en día, una alternativa que se está revisando para la eliminación total de los HFC son los compuestos hidrofluoroolefinas (HFO), los cuales, son compuestos orgánicos no saturados integrados por átomos de hidrógeno, flúor y carbono, que debido a la reactividad del enlace doble que presentan, son compuestos más reactivos en comparación con los HFC, lo cual reduce su tiempo de vida estratosférica. Además, estos compuestos tienen un PAO nulo y con el 0.1% de GWP referente a los HFC, los posiciona como compuestos amigables con el medio ambiente; sin embargo, éstos no cumplen con algunas características que se buscan para los gases refrigerantes ideales, como lo son: nula inflamabilidad y

transporte calorífico. Por tal motivo, aún se suelen usar en combinación con los HFC (Espinosa, 2017).

En la Tabla VII-1, se muestran dos ejemplos de HFO junto a su estructura y clave de identificación. El HFO-1234ze, en combinación con los HFC-125, HFC227ea, HFC134a, HFC-32 y CO₂, se emplea como refrigerante. Esta es una mezcla de gases zeotrópica¹⁴, no inflamable, con PAO = 0 y bajo GWP, que se usa como alternativa para instalaciones de refrigeración nuevas de media y baja temperatura. Por otro lado, el HFO-1234yf, es un refrigerante con PAO = 0 y un valor de GWP = 4. Este gas se usa en solitario, presentando características similares de funcionamiento en comparación directa con el HFC-134a; por lo cual, tiene la virtud de reemplazarlo en todas las aplicaciones donde se acepte una inflamabilidad leve.

Tabla VII-1 Ejemplos de hidrofluoroolefinas. Nombre químico, estructura y clave de identificación.

Nombre	Estructura	Clave
Trans-1,3,3,3-tetrafluoroprop-1-eno		HFO-1234ze
2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-eno		HFO-1234yf

Estos compuestos HFC son de gran interés por sus bajos valores de PAO y GWP; sin embargo, continúan investigaciones para poder optimizar sus características físicas y térmicas para poder sustituir completamente los HFC, asimismo, se buscan alternativas de compuestos que cubran las necesidades de equipos de enfriamiento cuya inflamabilidad no sea permitida.

¹⁴ Mezcla de dos o más refrigerantes puros con diferentes volatilidades.

VIII. Conclusiones

De acuerdo con las últimas evaluaciones científicas respecto a la reducción de la capa de ozono, ésta debería recuperarse para el año 2049 en las latitudes medias (30-60 grados al norte y sur). La evaluación sugiere, además, que la capa de ozono sobre el Antártico estaría recuperada para el año 2065, fecha que representa 15 años más tarde de lo esperado, debido a las especiales condiciones creadas por el frío y los vientos extremos en el Antártico. A pesar de esta demora, es claramente visible que las Partes del Convenio de Viena están teniendo éxito en la solución de un mayor problema global del medio ambiente (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2006).

Al desarrollar soluciones de refrigeración que sean más eficientes, más respetuosas con el ambiente, más baratas y fáciles de operar, la cadena de frío se volverá más efectiva y ampliamente disponible. Esto brindará a los fabricantes acceso a preenfriamiento, almacenamiento y transporte refrigerados, asegurando que los productos agrícolas lleguen a los mercados en buenas condiciones y reduciendo la pérdida de alimentos.

México, en particular, ha respetado y cumplido con las fechas establecidas en los calendarios de congelación y eliminación de SAO. Es un ejemplo de trabajo en conjunto a todas sus instituciones, legislación e industrias para reducir el daño que se generó por emisiones de gases nocivos al medio ambiente; así como, para revertir los efectos negativos y recuperar el estado óptimo de la capa de ozono. También, México forma parte de la investigación a nivel mundial para la satisfacción de necesidades cubiertas por los gases refrigerantes amigables con el medio ambiente.

Finalmente, de acuerdo con la información expuesta en el presente trabajo, se estima que hay más investigación científica por desarrollar, y así, tener un panorama mayor sobre la situación, para tomar acciones contundentes que cumplan las metas y necesidades establecidas a menor plazo, sin olvidar, que éstas sean amigables con el medio ambiente y eviten que se tenga de nueva cuenta, un deterioro en la capa de ozono.

IX. Referencias bibliográficas

- Araujo Pulido, G. T. (2010). Contaminación ambiental y sus efectos sobre la salud. *Viva Salud*, 6. https://www.insp.mx/resources/images/stories/INSP/Docs/cts/101208_cs1.pdf
- Calidad del Aire. (n.d.). El monitoreo de la calidad del aire: Normatividad. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Yw==>
- Castro, E. P., & Ramírez, R. Q. (2019). Sustentabilidad. Una visión multidisciplinaria. <http://ilitia.cua.uam.mx:8080/jspui/handle/123456789/690>
- Cirelli, A. F. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva* 11 (3), 147–170. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86325090002>
- Comisión Nacional del Agua. (2015). Atlas del agua en México 2015. In Atlas del agua en México 2015 (Coordinaci, p. 135). <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>
- Consejo de Salud Ocupacional. (2002). Propiedades de los fluorocarburos. In Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. https://www.cso.go.cr/quienes_somos/index.aspx
- Damià Barceló, L., & López de Alda, M. J. (n.d.). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes (pp. 1–26). Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales-CSIC. https://fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf_contaminacion.pdf
- Daniel Pabón, J., Pabón, D., León, G., Hurtado, G., Gonzalez, O. C., & Montealegre, É. J. (1998). La atmósfera, el tiempo y el clima (pp. 35–91). <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005192/medioambiente/cap3partel.pdf>
- Espinosa, J. P. G. (2017). Generación HFO: refrigerantes más eficientes y con Muy bajo pca para refrigeración y climatización. <https://www.proinstalaciones.com/articulos/tecnico/1494-generacion-hfo-refrigerantes-mas-eficientes-y-con-muy-bajo-pca-para-refrigeracion-y-climatizacion>
- Estrada Paneque, A., Gallo González, M., & Nuñez Arroyo, E. (2016).

- Contaminación Ambiental, su influencia en el ser humano, en especial: el sistema reproductor femenino. *Universidad y Sociedad*, 8(3), 80–86. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v8n3/rus10316.pdf>
- Fahey, D. W. (2002). Veinte Preguntas y Respuestas sobre la Capa de Ozono. *Evaluación Científica del Agotamiento de Ozono: 2002* (p. 38). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31180/20PreguntasdeOzono.pdf>
- Galán Madruga, D., & Fernández, P. R. (2006, December). Implicación de los NOx en la química atmosférica. *Instituto de Salud Carlos III*, 90–103. https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-41377/2006_2_david_galan_y_otro.pdf
- INEGI. (2021). Glosario. <https://www.inegi.org.mx/app/buscador/#tabMCcollapse-Indicadores>
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2021). Formación y destrucción del ozono estratosférico. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/formacion-y-destruccion-del-ozono-estratosferico>
- Kim, K.-H., Shon, Z.-H., Nguyen, H. T., & Jeon, E.-C. (2011). A review of major chlorofluorocarbons and their halocarbon alternatives in the air. *Atmospheric Environment*, 45(7), 1369–1382. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.029>
- Loverlock, J. E., Maggs, R. J., & Wade, R. J. (1973). Halogenated Hydrocarbons in and over the Atlantic. *Nature*, 241(5386), 194–196. <https://doi.org/10.1038/241194a0>
- Manahan, S. E. (2007). Introducción a la química ambiental. <http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/introduccion-a-la-quimica-ambiental-s.-e.-manahan2.pdf>
- Martín-Loeches Garrido, M., Fisher, R., Díaz Alcaide, S., & Martínez Santos, P. (2015). Aplicación de los clorofluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre como trazadores hidrogeológicos en los acuíferos carbonatados del Parque Natural del Barranco del Río Dulce (Guadalajara). *Estudios Geológicos*, 71(1), e025. <https://doi.org/10.3989/egeol.41787.332>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2007). Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. <https://prtr-es.es/>

Molina, M. J., & Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249(5460), 810–812. <https://doi.org/10.1038/249810a0>

Naciones Unidas: Secretaría de Ozono. (2021). UN Environment Programme Head: Ozone Agreement slows climate change and increases food security. <https://ozone.unep.org/un-environment-programme-head-ozone-agreement-slows-climate-change-and-increases-food-security>

Naciones Unidas. (2020). Día Internacional del Aire Limpio por un cielo azul 7 de septiembre. <https://www.un.org/es/observances/clean-air-day>

Naciones Unidas. (2021). Sobre El Día. <https://www.cleanairblueskies.org/es/about/sobre-el-dia>

NASA. (2019). Atmósfera terrestre. <https://spaceplace.nasa.gov/atmosphere/sp/>

OMS. (2021). Contaminación del aire ambiente (exterior). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial. (2000). La Convención de Viena y el Protocolo de Montreal_. https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/compendio_2000/04dim_institucional/04_10_Cooperacion_internacional/data_cooperacion/RecuadroIV.10.2_a.htm

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2001). Manual de capacitación de oficiales de aduana. <http://www.pnuma.org/ozono/curso/pdf/manual.pdf>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2006). Manual del Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono (Séptima ed). https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-09/VC_Handbook_2006_Spanish.pdf

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2019). Entra en vigor la Enmienda Kigali, un poderoso aliado en la lucha contra el cambio climático. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/entra->

- en-vigor-la-enmienda-kigali-un-poderoso-aliado-en
- Rodríguez Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). La contaminación del suelo: Una realidad oculta.
- Sabogal, N. A. (1998). El Protocolo de Montreal, un modelo de concertación para la protección de la capa de ozono. *Relaciones Internacionales*, 7. <https://revistas.unlp.edu.ar/RRII-IRI/article/view/1787>
- Sandoval, H. (2016). Contaminación y contaminantes, aspectos científicos, teóricos y prácticos. https://www.cepchile.cl/cep/site/artic/20160304/asocfile/20160304093941/15_cap4sandoval_libromambiente.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). Protocolo de Montreal, a 30 años de su establecimiento. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-montreal-a-30-anos-de-su-establecimiento>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). Día Internacional de la Preservación de la Capa de Ozono 2021. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/dia-internacional-de-la-preservacion-de-la-capa-de-ozono-2021?idiom=es>
- Secretaría del Medio Ambiente. (2019). Evaluarán impacto de la contaminación del aire en la salud. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/evaluaran-impacto-de-la-contaminacion-del-aire-en-la-salud>
- Secretaría del Ozono. (2020a). Datos del país: México. <https://ozone.unep.org/countries/profile/mex>
- Secretaría del Ozono. (2020b). Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono (Decimoterc). <https://ozone.unep.org/sites/default/files/Handbooks/MP-Handbook-2020-Spanish.pdf>
- Secretaría del Ozono. (2021). Parties to the Montreal Protocol continue online discussions on unexpected emissions of CFC-11 and energy efficiency. 20 julio. <https://ozone.unep.org/parties-montreal-protocol-continue-online-discussions->

unexpected-emissions-cfc-11-and-energy

SRALA. (2019). Contaminación del Agua en México.
<https://srala.org/contaminacion-del-agua-en-mexico/>

Velders, G. J. M., Ravishankara, A. R., Miller, M. K., Molina, M. J., Alcamo, J., Daniel, J. S., Fahey, D. W., Montzka, S. A., & Reimann, S. (2012). Preserving Montreal Protocol Climate Benefits by Limiting HFCs. *Science*, 335(6071), 922–923.
<https://doi.org/10.1126/science.1216414>