

Libros de **Cátedra**

Calidad del aire

Monitoreo y modelado de contaminantes atmosféricos.
Efectos en la salud pública

Andrés Porta, Erica Yanina Sanchez
y Esteban Colman Lerner (coordinadores)

FACULTAD DE
CIENCIAS EXACTAS

e
exactas



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

CALIDAD DEL AIRE

MONITOREO Y MODELADO DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS. EFECTOS EN LA SALUD PÚBLICA

Andrés Porta

Erica Yanina Sanchez

Esteban Colman Lerner

(coordinadores)

Facultad de Ciencias Exactas



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA**



Editorial
de la Universidad
de La Plata

INDICE

Prólogo	5
CAPÍTULO 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ATMÓSFERA	6
<i>E.Y. Sanchez, A. Porta</i>	
La atmósfera terrestre	6
Ecuación de estado	9
Composición de la atmósfera	11
Teoría sobre el origen de la atmósfera y su evolución hasta el presente	14
Equilibrio de la atmósfera actual	17
Estructura vertical de la atmósfera	26
Bibliografía	34
CAPITULO 2. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	35
<i>J.E. Colman Lerner, D. Mellado, E.Y. Sanchez</i>	
Contaminación atmosférica: definición y evolución	35
Introducción a la química atmosférica	46
Contaminantes atmosféricos	47
Clasificaciones de contaminantes	57
Fuentes de contaminación atmosférica	60
Efectos de la contaminación atmosférica	64
Bibliografía	98
CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS METEOROLÓGICOS DE LA DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES	100
<i>E.Y. Sanchez, K.B. Balbi</i>	
Introducción	100
Radiación solar	101
Balance de energía sistema Tierra-Atmósfera	106
Temperatura y distribución de calor	107
Presión atmosférica y vientos	113
Turbulencia	118
Estabilidad atmosférica	120
Capa de mezcla	126
Dispersión y transporte atmosférico	131
Influencia de los parámetros meteorológicos en la mezcla y la dispersión de los contaminantes atmosféricos	132
Estabilidad y comportamiento de plumas	134
Bibliografía	138

CAPÍTULO 4. MONITOREO DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	139
<i>J.E. Colman Lerner, M. Orte, D. Giuliani</i>	
Introducción	139
Metodologías para monitoreo de COVs	142
Metodologías de muestreo de COSVs	149
Monitoreo de Material Particulado	154
Fuentes fijas	163
Bibliografía	175
CAPÍTULO 5. MODELOS DE CALIDAD DE AIRE	182
<i>K.B. Balbi, D. Mellado, E.Y. Sanchez</i>	
Introducción	182
Ecuaciones gobernantes	183
Grillas o mallas	191
Clasificaciones de modelos	192
Software disponible	205
Bibliografía	222
CAPÍTULO 6. CONTAMINACIÓN INTRAMUROS	225
<i>L. Massolo, G. Castagnasso</i>	
Introducción	225
Principales contaminantes intramuros	227
Bibliografía	246
CAPÍTULO 7. GESTIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE AIRE	248
<i>G. Castagnasso, L.A. Massolo</i>	
Introducción	248
Normas y niveles guía	249
Control de los efluentes gaseosos y permiso de descarga	256
Vínculo entre emisiones y calidad del aire mediante la aplicación de “modelos de dispersión” en la Provincia de Buenos Aires	258
Bibliografía	259
CAPÍTULO 8. EFECTOS EN LA SALUD DE LOS CONTAMINANTES	261
<i>M. Aguilar, D. Giuliani, M. Gutiérrez, S. Represa, A. Porta</i>	
Efectos en la salud del aire contaminado	261
Evidencias epidemiológicas y de estudios de casos	266
Evaluación de efectos asociados	273
Herramientas para la evaluación del riesgo a la salud. Índices y mapas	282
Bibliografía	288

Prólogo

Actualmente la problemática ambiental debe abordarse como un estudio interdisciplinario, lo que conduce a adquirir conocimientos básicos de variadas disciplinas relacionadas con el tema. En este sentido, el presente libro se enfoca en el estudio de la contaminación atmosférica y sus efectos en la salud, y atraviesa transversalmente los contenidos básicos de diferentes materias de la Licenciatura en Química y Tecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.

Nuestra experiencia de una década trabajando en esta temática, en investigación, docencia, extensión, asesoramiento y gestión, nos ha permitido revisar, seleccionar y sistematizar la literatura específica, aportando una visión integral y actualizada, y de este modo elaborar un libro donde se puedan desarrollar los conceptos centrales y las metodologías adecuadas que presenta la problemática de la contaminación del aire en el contexto del paradigma del desarrollo sustentable, con una terminología accesible a los estudiantes de esta carrera, partiendo de los conocimientos de materias del ciclo básico común para los estudiantes de Ciencias Exactas (CIBEX), para profundizar aspectos específicos de las materias del ciclo superior involucradas en el texto.

Desde esta perspectiva y enmarcado no solo en el contexto internacional, sino también en las problemáticas ambientales de nuestro país, en este libro se presenta la atmósfera terrestre, considerando su composición y estructura; los contaminantes atmosféricos, considerando la química atmosférica, las fuentes de los contaminantes y sus principales efectos asociados; se brindan fundamentos básicos de meteorología; se profundiza en el muestreo y la determinación de los contaminantes del aire; se plantean y desarrollan los distintos modelos de distribución de los contaminantes atmosféricos; se analiza la situación de la contaminación intramuros; se profundizan los efectos en la salud de la contaminación del aire y finalmente se presentan herramientas básicas para la gestión y el diagnóstico de la calidad del aire.

De este modo se pretende contribuir a una mejor preparación de los estudiantes de las ciencias ambientales y cubrir temáticas abordadas en las asignaturas Modelos de dispersión y distribución de contaminantes; Gestión y diagnóstico ambiental; Contaminación ambiental y salud, y Química analítica ambiental.

CAPITULO 2

Contaminantes atmosféricos

J.E. Colman Lerner, D. Mellado, E.Y. Sanchez

Contaminación atmosférica. Definición y evolución

Se entiende por contaminación atmosférica a la presencia en la atmósfera de cualquier agente físico, químico o biológico, o de combinaciones de los mismos en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, seguridad o bienestar de la población, o perjudiciales para la vida animal y vegetal o impidan el uso y goce de las propiedades y lugares de recreación (1). En tal sentido, un contaminante puede ser una sustancia química, o energía (como el ruido, el calor o la radiactividad). La experiencia cotidiana demuestra que la contaminación atmosférica cambia constantemente con las actividades humanas y las condiciones meteorológicas, y en consecuencia este estado no puede ser considerado como estático. Un ejemplo de ello lo constituye, el barrido de una niebla contaminante tras el paso de un frente, o cambios en las actividades desarrolladas en un área específica que modifican las emisiones a la atmósfera.

Antecedentes históricos

La contaminación del aire y los esfuerzos por controlarla no son un fenómeno reciente, las primeras actividades relacionadas con dicho control datan del siglo XIII, cuando el rey Eduardo I de Inglaterra prohibió la quema de ciertos carbones altamente contaminantes en Londres originando las primeras ordenanzas de control de la contaminación (CEPIS, 1982). Durante el reinado de Ricardo II (1377-1399), y en el de Enrique V (1413-1422), en Inglaterra se reglamentó y restringió el uso del carbón. Una de las primeras publicaciones de que se tiene conocimiento y que trata de la contaminación del aire es un libro publicado en 1661 por orden real de Carlos II: "Fumifugium: o la inconveniencias del aire y el humo diseminado de Londres; junto con algunas soluciones propuestas con toda humildad" escrito por John Evelyn (3).

El uso del carbón para generar energía fue un importante factor en la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII, la cual se constituyó en la base de nuestra sociedad tecnológica actual, aunque lamentablemente al mismo tiempo el punto de partida de la contaminación y degradación del ambiente. A mediados del siglo XIX se inicia la explotación del petróleo. Su refinación y la industria automovilística crecen exponencialmente en el siglo XX, junto con industrias derivadas, el acero y el caucho. A partir de la II Guerra Mundial el desarrollo

tecnológico cada vez más sofisticado aumentó y aceleró la contaminación del aire de manera, prácticamente inadvertida. Los casos de contaminación se agravaron considerablemente después de la Segunda Guerra Mundial cuando en el mundo aumentó el consumo de energía, así como la extracción, producción y el uso de diversas sustancias tanto naturales como artificiales rebasando la capacidad de los ecosistemas para regenerarlas, asimilarlas y/o degradarlas.

Los procesos naturales, entre los que se encuentran los incendios forestales, la descomposición de la materia orgánica, las tormentas de arena y las erupciones volcánicas, siempre han contaminado el aire. Mediante la precipitación, oxidación y absorción en los océanos y el suelo, la atmósfera ha podido limpiarse por sí sola; sin embargo, aun siendo mucho menor la cantidad de los gases y material particulado reconocidos como contaminantes y emitidos por fuentes antropogénicas comparada con la cantidad emitida por fuentes naturales, la tasa a la que el hombre descarga los contaminantes a la atmósfera en regiones densamente pobladas excede a veces la capacidad de limpieza natural de la atmósfera. Por lo anterior, la mayor parte de la contaminación del aire la provoca el hombre.

El interés por la contaminación del aire en América Latina y el Caribe se inició en la década de los cincuenta, cuando las universidades y los ministerios de salud efectuaron las primeras mediciones de la contaminación del aire. En 1965, la Organización Panamericana de la Salud (OPS) comenzó a establecer programas de investigación sobre contaminación del agua y aire, así como colaborar con los Gobiernos Miembros en el desarrollo de políticas adecuadas de control (2).

Los tres episodios de contaminación del aire más famosos del siglo XX (tabla 1) sucedieron en el Valle del Meuse (Bélgica), en Donora (Pensilvania) y en Londres (Inglaterra). Los tres eventos coincidieron con una condición meteorológica particular: inversión térmica. En este contexto, la dispersión se vio dificultada y tanto las masas de aire superficiales como los contaminantes emitidos a la atmósfera se concentraron alrededor de sus fuentes. En el episodio del Valle del Meuse, ocurrido en diciembre de 1930, la atmósfera de una zona industrial de Bélgica se cubrió durante 3 días de una espesa niebla, por lo que cientos de personas enfermaron y 60 murieron. Poco después, en 1931, una espesa niebla cubrió el área de Manchester y Salford en Inglaterra durante 9 días lo que conllevó a la muerte de 592 personas. En 1948, en el episodio de Donora, Pennsylvania, un pequeño pueblo en donde había plantas químicas y acerías se cubrió por una niebla durante 4 días y enfermó a casi la mitad de sus 14000 habitantes (20 de ellos murieron). Diez años después los residentes de Donora que habían estado gravemente enfermos durante el episodio mostraron una tasa más alta de enfermedad y morían antes que el promedio de todos los habitantes (3).

Tabla 1. Episodios más famosos de contaminación en el siglo XX

Episodio	Año	Exceso de mortalidad	Causas propuestas
Meuse Valley	1930	60+	SO ₂ , fluoruros, H ₂ SO ₄
Donora	1948	20	SO ₂ , material particulado
Londres	1952	4000+	SO ₂ , material particulado, H ₂ SO ₄

En el episodio de Londres, ocurrido en 1952, se evidenció el siniestro potencial de la contaminación del aire: una niebla cubrió la ciudad del 5 al 8 de diciembre, y 10 días después se supo que el número total de muertes en la región principal de Londres sobrepasaba en 4000 al promedio. Las estadísticas indicaron que casi todos los que habían muerto inesperadamente tenían antecedentes clínicos de bronquitis, enfisema o trastornos cardíacos y que las personas clasificadas en la última categoría eran las más vulnerables (3).

Contaminación en los tiempos que corren

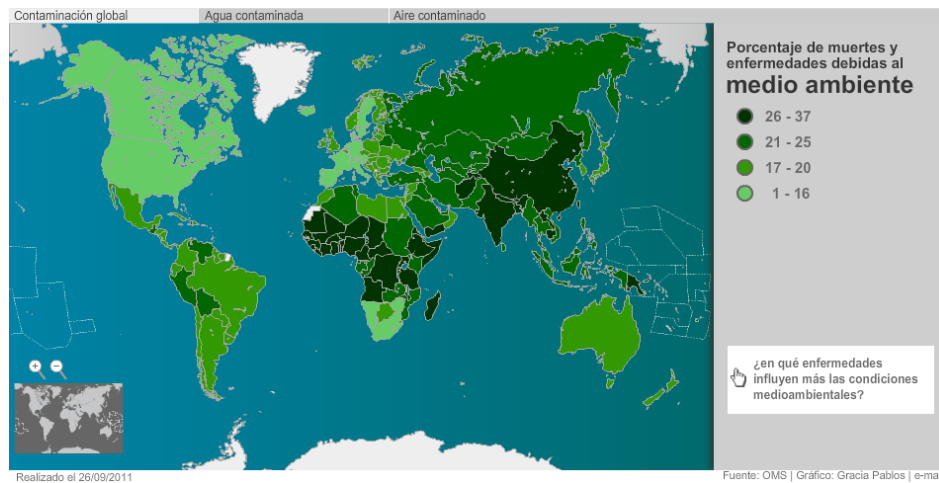
En el 2014 la OMS informó que en 2012, 7 millones de personas murieron como consecuencia de la exposición a la contaminación atmosférica, duplicando las estimaciones anteriores y confirmando que la contaminación del aire constituye el riesgo ambiental para la salud más importante del mundo. Incluso, que más del 50% de esta carga de enfermedad recae en las poblaciones de los países en desarrollo. Asimismo, la Agencia internacional de investigación sobre el cáncer (IARC) en su informe de prensa 221/13 ha categorizado al aire ambiente contaminado (extramuros) como carcinogénico comprobado, categoría IA.

En nuestra región, estos informe se hacen eco de la abundante evidencia epidemiológica que correlaciona la exposición crónica a contaminantes relacionados a la industria petroquímica y al tráfico vehicular, como material particulado (MP), metales, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), compuestos orgánicos volátiles (COVs), con efectos adversos sobre el desarrollo y la función pulmonar, sobre el sistema cardiovascular, e incremento de la mortalidad (1-7). En este marco, adquiere particular relevancia el acuerdo firmado por Argentina junto a los países de América Latina denominado “Plan de Acción Regional de Cooperación Intergubernamental en Materia de Contaminación Atmosférica para América Latina y el Caribe” (4) dando origen al Plan de Acción Nacional sobre Contaminación Atmosférica, que cuenta entre sus objetivos establecer una base de datos de alcance nacional sobre la calidad del aire. Esta resolución viene a remediar la carencia de estudios de calidad de aire, en calidad y cantidad, a nivel nacional, provincial o municipal. Entre los estudios vigentes, algunos se relacionan con regiones industriales críticas (Zárate-Campana o Bahía Blanca, Prov. Buenos Aires), además de las estaciones de monitoreo continuo en CABA o las emplazadas por el ACUMAR; y los estudios sobre la calidad del aire en La Plata.

En la Figura 2 se muestran mapas elaborados por la OMS que detallan la contaminación ambiental (a) y la contaminación del aire (b) a nivel mundial, en 2011. En dicho estudio participaron más de 100 expertos que analizaron 14 regiones del planeta con el objetivo de conocer cuáles son los factores de este tipo que más afectan a la salud. El mapa detalla la contaminación que hay en cada país según una escala que va del verde claro al verde oscuro.

El estudio analizó la presencia de partículas grandes y partículas chicas en el ambiente y consecuentemente la contaminación atmosférica que hay en el mundo.

(a)



(b)

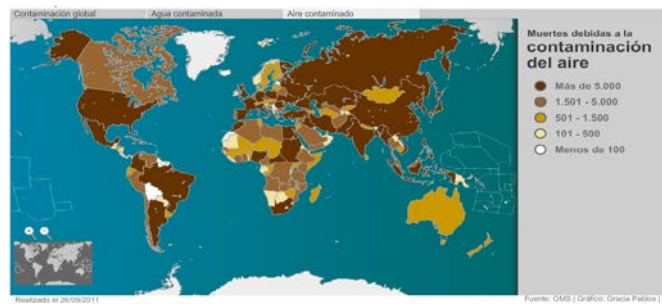


Figura 1: Mapas de la contaminación ambiental (a) y la contaminación del aire (b) a nivel mundial, en función de las muertes asociadas.

Adicionalmente, un estudio sobre la contaminación revela datos preocupantes acerca de la contaminación atmosférica y la mortalidad a escala mundial por enfermedades relacionadas en el ser humano debido a este problema ambiental durante 2013. Los automóviles, la industria o la quema de madera son algunas de las acciones que más muertes provocan en países como China e India. El informe, elaborado por un grupo de investigadores de Canadá (5), muestra de forma ilustrada (Figura 3) los lugares donde se han producido más fallecimientos en 2013 por esta causa, clasificada en dos grupos concretos: la contaminación extramuros (automóviles, industria, agricultura) y la contaminación intramuros (cocinas de carbón o quema de madera).

Carga Global de la contaminación atmosférica

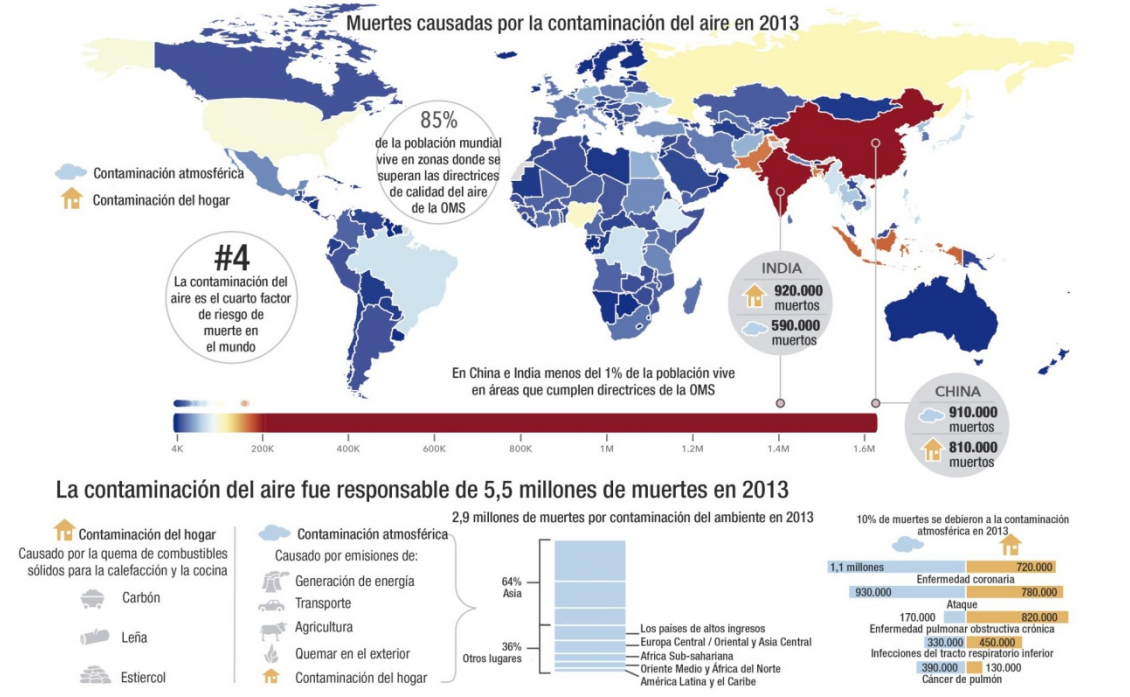


Figura 3: Carga global de la contaminación del aire (Brauer et al., 2015)

China e India son los países que concentran más de la mitad de estas muertes con 1.6 y 1.4 millones de defunciones respectivamente. A grandes rasgos, Asia concentra las cifras más alarmantes en esta materia con un 64 por ciento de las defunciones en todo el mundo, con países como Indonesia o Pakistán que acompañan este problema en la contaminación del aire.

El 36 por ciento restante se reparte en el resto del mundo, coronado por los países desarrollados, seguido del Este de Europa, África subsahariana, Oriente Medio y norte de África, así como América Latina y el Caribe. Países como Estados Unidos, Rusia y Nigeria ocupan una posición intermedia con muertes que rondan las 100 mil personas. A la cola en contaminación y con una envidiable preocupación ambiental se encuentran países como Canadá, Australia, Islandia o el resto de países nórdicos.

El gráfico realizado por el Instituto para la Medición y Evaluación de la salud en la Universidad de Washington muestra que no hay una gran diferencia entre el número de muertes por contaminación interior y exterior. En China, por ejemplo, se produjeron 910 mil muertes por polución exterior y 100 mil menos por contaminación en espacios cerrados. En cambio, en India las muertes en espacios cerrados superan en 330 mil las muertes por contaminación exterior. El informe indica que estos contrastes se deben a las diferentes prácticas que realiza cada país. En China la quema de carbón al aire libre es la causa fundamental del mal estado del aire, provocando 366 mil muertes en el país sólo con esta práctica. En el caso de que China no tome medidas de control y reducción en la quema de carbón, en 2030 la cifra de muertes podrían superar el millón de personas.

A la inversa, prácticas como la combustión de madera para cocinar o como uso de calefacción son habituales en India, provocando que miles de familias estén expuestos a partículas nocivas para su salud.

El instituto afirma que en los últimos veinte años, la contaminación del aire ha disminuido en los países con ingresos más altos y destaca las medidas adoptadas por Europa occidental, Norteamérica y Japón para combatirla. Sin embargo, indica que a nivel mundial los niveles de polución han aumentado por países como China y el sur de Asia.

Calidad del aire

La calidad del aire de una región está fuertemente influenciado por parámetros meteorológicos como la temperatura ambiente, la magnitud y la dirección del viento, la cobertura nubosa, y la lluvia/nieve/ granizo, etc. incluyendo la naturaleza del suelo, la biota y las diferentes actividades que se realizan en un territorio.

Para definir la calidad del aire de una región, se establece un índice de calidad del aire (AQI) en una escala que va de buena a mala (6). Cuando se incrementa el valor de AQI, un porcentaje creciente de la población podría verse afectada por los efectos adversos de los contaminantes estudiados. El principal problema es que no hay ningún valor de AQI unificado, y diferentes países tienen sus propios índices de calidad del aire, que corresponden a diferentes normas nacionales de calidad del aire.

Urbanización y contaminación

La población mundial vive mayoritariamente en áreas urbanas (7), concentradas en megaciudades (con poblaciones superiores a los 10 millones). Las megaciudades no solo constituyen centros de crecimiento de las economías sino también, importantes fuentes de contaminantes atmosféricos y agentes precursores del cambio climático (8).

Entre 1950 y 2005 la población mundial aumentó de 2.5 a 6.5 billones, y se espera que para 2050 el número ascienda a 9.1 billones (UN-DESA, 2016). Lo interesante para el análisis abordado en la materia, es que el aumento de la población mundial está acompañado de un aumento en el porcentaje de personas que viven en zonas urbanas (Figura 4). Si bien los porcentajes de población urbana son más altas en los países desarrollados que en los países en desarrollo, América del Sur constituye una excepción ya que a la actualidad la población urbana alcanza el 83% de la población total (Figura 5). Estos dramáticos aumentos de la población total y especialmente aquella urbanizada, se han visto acompañados de crecimiento tecnológico y desarrollo económico, de modificaciones en los usos del suelo, uso irracional de los recursos, y gran demanda de energía y transporte. Estas modificaciones en pos de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos han representado un impacto dramático sobre la calidad del medio ambiente. Como ejemplos significativos, cabe mencionar las emisiones antropogénicas y biogénicas, que han alterado la composición atmosférica a diferentes escalas. En este aspecto, el intento de comprender el impacto de la urbanización sobre la química atmosférica resulta de sumo interés en los tiempos que corren.

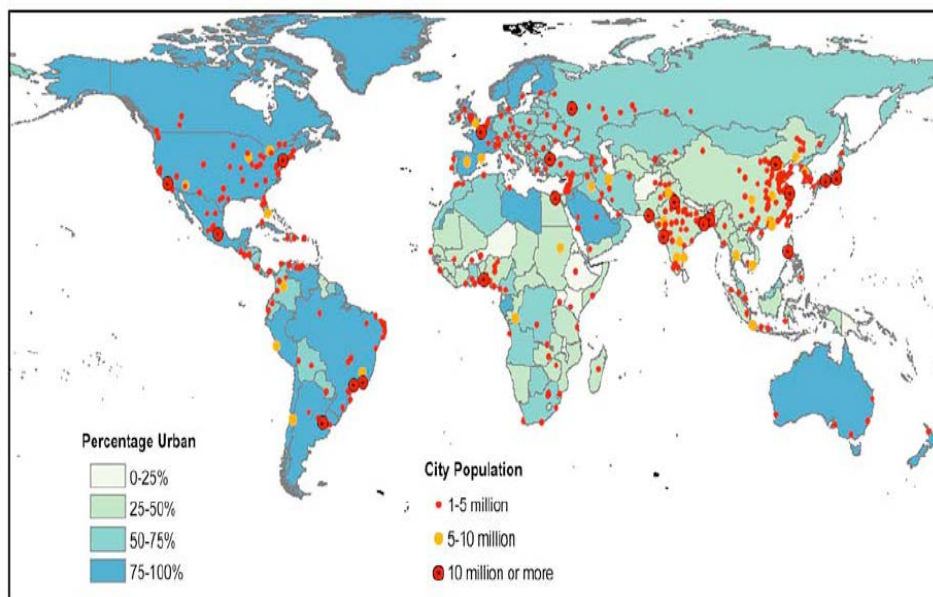


Figura 4: Aglomeración en centros urbanos en 2009 (proporción de la población urbana respecto a la población mundial: 50.1%). Fuente: UN- Department of Economic and Social Affairs, 2010.

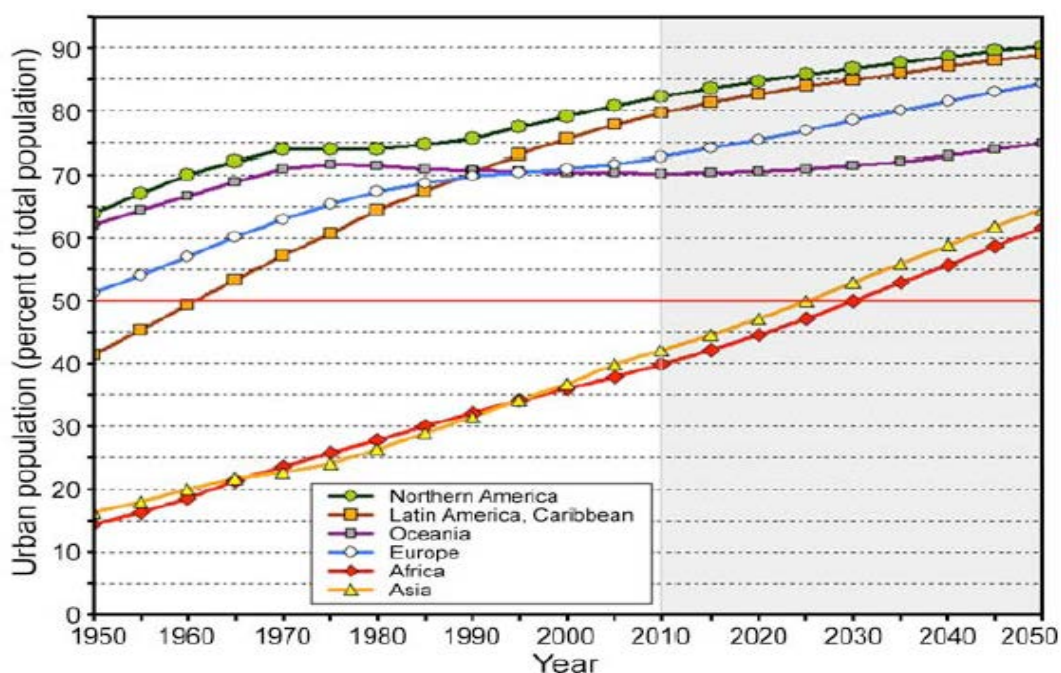


Figura 5: Población urbana en grandes áreas geográficas (porcentaje de población total). Fuente: Department of Economic and Social Affairs, 2010.

La escala geográfica y la intensidad del impacto de mega ciudades sobre la contaminación atmosférica y el clima están determinadas no sólo por la magnitud de sus emisiones, sino también por su geografía y la meteorología regional. Estos factores afectan el grado en que están atrapados los contaminantes, tal es el caso de las ciudades emplazadas en valles rodeadas de montañas, o aquellas caracterizadas por inversiones atmosféricas persistentes. No obstante, cabe destacar que la mayor parte de las megas ciudades del mundo están situadas en las zonas costeras, en donde prevalece la mezcla de masas de aire urbanas y marinas.

Claramente, cada área urbana debe ser tratada como un escenario de características únicas para el estudio de los impactos de la urbanización en la química atmosférica.

Índices de calidad del aire

Un índice de calidad del aire "ICA" (AQI, por sus siglas en inglés) es un número utilizado por las agencias gubernamentales para comunicar al público lo contaminado que se encuentra el aire en un determinado sitio. A medida que aumenta el ICA, es probable que un porcentaje cada vez mayor de la población experimente efectos adversos a la salud.

Diferentes países tienen sus propios índices de calidad del aire, que corresponden a diferentes normas nacionales de calidad del aire. Algunos de estos son el Índice de Salud Calidad del Aire (Canadá), el índice de calidad de aire de la US EPA y el índice de calidad de aire diario del Reino Unido (9-11).

El cálculo del ICA requiere una concentración de contaminante del aire durante un período de promedio especificado, obtenido de un monitor o modelo. En conjunto, la concentración y el tiempo representan la dosis del contaminante en aire. Los efectos en la salud correspondientes a una dosis dada se establecen mediante investigaciones epidemiológicas. Los contaminantes varían en potencia, y la función utilizada para convertir de concentración de contaminante a ICA varía según el contaminante.

Los valores del índice de calidad del aire se agrupan generalmente en rangos. A cada rango se le asigna un descriptor, un código de color y un aviso de salud pública estandarizado.

El ICA puede aumentar debido a un aumento de las emisiones a la atmósfera (por ejemplo, durante el tráfico en horas pico o cuando hay un incendio forestal contra el viento) o por la falta de dilución de los contaminantes del aire. El aire estancado, causado a menudo por un anticiclón, la inversión de la temperatura, o las velocidades bajas del viento permite que la contaminación atmosférica permanezca en un área local, conduciendo a altas concentraciones de contaminantes, y que se produzcan reacciones químicas entre los contaminantes del aire.

Para un día en que se prevé que el ICA se eleve debido a la contaminación por partículas finas o aumento de concentración de algún contaminante, una agencia o una organización de salud pública podrían:

- Aconsejar a grupos sensibles, como ancianos, niños y aquellos con problemas respiratorios o cardiovasculares que eviten el esfuerzo al aire libre.
- Alentar medidas voluntarias para reducir las emisiones al aire, como el uso del transporte público.
- Recomendar el uso de máscaras para evitar ingreso de partículas finas a los pulmones.

La mayoría de los contaminantes del aire no tienen un ICA asociado. Muchos países vigilan el ozono troposférico, material particulado, dióxido de azufre, el monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno y calculan los índices de calidad del aire para estos contaminantes. La definición del ICA en una nación en particular refleja el discurso que rodea el desarrollo de los estándares nacionales de calidad del aire en esa nación.

Por ejemplo, el índice de calidad del aire más utilizado en el Reino Unido es el Índice de Calidad del Aire Diario recomendado por el Comité sobre los Efectos Médicos de los Contaminantes Atmosféricos (COMEAP). Este índice tiene diez puntos, que se agrupan en 4

bandas (tabla 2): baja, moderada, alta y muy alta. Cada una de las bandas viene con consejos para grupos en riesgo y la población en general. El índice se basa en las concentraciones de 5 contaminantes, ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, MP_{2,5} y MP₁₀. Los puntos de ruptura entre los valores de índice se definen por cada contaminante por separado y el índice global se define como el valor máximo del índice.

Tabla 2. Valores del ICA Reino Unido

Banda	Valor	Consejo a grupos de riesgo	Consejos al público en general
Bajo	1-3	Disfrute sus actividades regulares al aire libre	Disfrute sus actividades regulares al aire libre
Moderado	4-6	Adultos y niños con problemas pulmonares, y adultos con problemas cardíacos, ambos con síntomas, deben considerar reducir la actividad física extenuante, particularmente al aire libre	Disfrute sus actividades regulares al aire libre.
Alto	7-9	Adultos y niños con problemas pulmonares, y adultos con problemas cardíacos, deben reducir el esfuerzo físico extenuante, particularmente al aire libre, y si experimentan síntomas. Las personas con asma pueden necesitar su inhalador de alivio con más frecuencia. Las personas mayores también deben reducir el esfuerzo físico.	Cualquier persona con molestias (dolor de ojos, tos o dolor de garganta) debe reducir la actividad, especialmente al aire libre.
Muy Alto	10	Adultos y niños con problemas pulmonares, adultos con problemas cardíacos, y personas mayores, deben evitar la actividad física extenuante. Las personas con asma pueden encontrar que necesitan usar su inhalador de alivio con más frecuencia.	Reduzca el esfuerzo físico, especialmente al aire libre, especialmente si experimenta síntomas como tos o dolor de garganta.

Tabla 3. Niveles de ICA para cada contaminante

ICA	Ozono, media 8 h ($\mu\text{g m}^{-3}$)	NO ₂ , media horaria ($\mu\text{g m}^{-3}$)	SO ₂ , media 15 minutos ($\mu\text{g m}^{-3}$)	MP _{2,5} , media 24 h ($\mu\text{g m}^{-3}$)	MP ₁₀ , media 24 h ($\mu\text{g m}^{-3}$)
1	0-33	0-67	0-88	0-11	0-16
2	34-66	68-134	89-177	12-23	17-33
3	67-100	135-200	178-266	24-35	34-50
4	101-120	201-267	267-354	36-41	51-58
5	121-140	268-334	355-443	42-47	59-66
6	141-160	335-400	444-532	48-53	67-75
7	161-187	401-467	533-710	54-58	76-83
8	188-213	468-534	711-887	59-64	84-91
9	214-240	535-600	888-1064	65-70	92-100
10	e 241	e 601	e 1065	e 71	e 101

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha desarrollado un Índice de Calidad del Aire. Este AQI se divide en seis categorías que indican niveles crecientes de preocupación por la salud. Un valor ICA superior a 300 representa calidad del aire peligroso y por debajo de 50 la calidad del aire es buena.

El ICA se basa en los cinco contaminantes "criterios" regulados por la Ley de Aire Limpio: ozono a nivel del suelo, partículas, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. La EPA ha establecido Normas Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS) para cada uno de estos contaminantes con el fin de proteger la salud pública.

Un valor ICA de 100 corresponde generalmente al nivel del NAAQS para el contaminante, La Ley del Aire Limpio (USA) (1990) requiere que la EPA revise sus Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiente cada cinco años para reflejar la evolución de la información sobre los efectos sobre la salud. El Índice de Calidad del Aire se ajusta periódicamente para reflejar estos cambios.

Tabla 4. Niveles de ICA para cada contaminante de la EPA

ICA	Nivel respecto a la salud	Color
0-50	Bueno	Verde
51-100	Moderado	Amarillo
101-150	Insalubre para grupos sensibles	Naranja
151-200	Insalubre	Rojo
201-250	Muy insalubre	Violeta
251-300	Peligroso	Granate

El índice de calidad del aire es una función lineal por partes de la concentración de contaminantes. En el límite entre las categorías del ICA, hay un salto discontinuo de una unidad ICA, siendo la ecuación la siguiente:

$$I = \frac{I_{high} - I_{low}}{C_{high} - C_{low}} (C_{high} - C_{low}) + I_{low}$$

donde:

I = es el índice de calidad del aire (ICA)

C = concentración de contaminantes,

$C_{(low)}$ = el punto de ruptura de la concentración que es d C,

$C_{(high)}$ = el punto de ruptura de la concentración que es e C,

$I_{(low)}$ = el punto de ruptura del índice correspondiente a $C_{(low)}$,

$I_{(high)}$ = el punto de ruptura del índice correspondiente a $C_{(high)}$

Si se miden múltiples contaminantes en un sitio de monitoreo, entonces se indica el valor AQI más grande o "dominante" para la ubicación. El ICA del ozono entre 100 y 300 se calcula seleccionando el mayor del ICA calculado con un valor de ozono de 1 hora y el ICA calculado con el valor de ozono de 8 horas. En la tabla 5 se muestran los valores de cortes usados por la EPA.

Tabla 5. Valores de corte usados por la EPA para calcular el ICA

O₃ (ppb)	O₃ (ppb)	PM_{2.5} (µgm⁻³)	PM10 (µgm⁻³)	CO (ppm)	SO₂ (ppb)	NO₂ (ppb)		ICA
$C_{low} - C_{high}$ (media)	$C_{low} - C_{high}$ (media)	$C_{low} - C_{high}$ (media)	$C_{low} - C_{high}$ (media)	$C_{low} - C_{high}$ (media)	$C_{low} - C_{high}$ (media)	$C_{low} - C_{high}$ (media)	$I_{low} - I_{high}$	Categoría
0-54 (8 h)	-	0.0-12.0 (24 h)	0-54 (24 h)	0.0-4.4 (8 h)	0-35 (1 h)	0-53 (1 h)	0-50	Bueno
55-70 (8 h)	-	12.1-35.4 (24 h)	55-154 (24 h)	4.5-9.4 (8 h)	36-75 (1 h)	54-100 (1 h)	51-100	Moderado
71-85 (8 h)	125-164 (1-hr)	35.5-55.4 (24 h)	155-254 (24 h)	9.5-12.4 (8 h)	76-185 (1 h)	101-360 (1 h)	101-150	Insalubre para grupos sensibles
86-105 (8 h)	165-204 (1-hr)	55.5-150.4 (24 h)	255-354 (24 h)	12.5-15.4 (8 h)	186-304 (1 h)	361-649 (1 h)	151-200	Insalubre
106-200 (8 h)	205-404 (1-hr)	150.5-250.4 (24 h)	355-424 (24 h)	15.5-30.4 (8 h)	305-604 (24 h)	650-1249 (1 h)	201-300	Muy insalubre
-	405-504 (1-hr)	250.5-350.4 (24-hr)	425-504 (24-hr)	30.5-40.4 (8-hr)	605-804 (24-hr)	1250-1649 (1-hr)	301-400	Peligroso
-	505-604 (1-hr)	350.5-500.4 (24-hr)	505-604 (24-hr)	40.5-50.4 (8-hr)	805-1004 (24-hr)	1650-2049 (1-hr)	401-500	Peligroso

Introducción a la química atmosférica

Durante muchos siglos "la dilución era la solución", es decir, poner chimeneas cada vez más altas para amortiguar los impactos sobre la salud humana en las zonas aledañas. Sin embargo, los eventos históricos han motivado a la comunidad científica y a las autoridades competentes a abordar estudios sobre la química atmosférica y contaminantes del aire, y a implementar regulaciones para la mejora de la calidad del aire.

En este contexto, es sabido que la mayoría de las sustancias presentes en la troposfera son transformadas allí por mecanismos físicos y/o químicos, por lo que solo las especies menos reactivas alcanzan la estratosfera e intervienen en la química de esta región. Por otra parte, el contenido de agua de la estratosfera es muy bajo, con ausencia de precipitaciones, ya que la mayor parte del vapor de agua condensa antes de atravesar la tropopausa. Por este motivo, la eliminación de contaminantes gaseosos y particulados por precipitación, un mecanismo de autodepuración de la atmósfera, no está generalmente presente en la estratosfera. Consecuentemente, los materiales que de alguna forma entran en la estratosfera por difusión lenta a través de la tropopausa, corrientes verticales en los trópicos, erupciones volcánicas y tormentas, entre otros, permanecen en ella largos periodos de tiempo formando capas estratificadas (12).

Química estratosférica

A diferencia del resto de los componentes traza, normalmente la concentración de ozono aumenta en los primeros kilómetros de la estratosfera alrededor de un orden de magnitud. Además de las reconocidas propiedades que presenta el ozono en la estratosfera como escudo protector de los organismos vivos, determina el perfil vertical de temperatura de la estratosfera siendo responsable del calentamiento estratosférico y constituye un gas muy reactivo que lo involucra en muchas reacciones químicas. Por estos motivos, la química de la estratosfera gira en torno a la química del ozono y al efecto que las distintas especies traza presentes tienen sobre la concentración del mismo. La complejidad de la química de esta región, aun siendo extensa, es inferior a la de la troposfera debido a que el número de especies químicas presentes es mucho menor.

Química troposférica

Las especies químicas presentes en la troposfera, bien por formar naturalmente parte de la composición de ésta o bien porque han sido adicionadas a esta matriz, una vez se encuentran en ella pueden experimentar reacciones químicas en la zona de emisión, ser transportadas o ser depositadas sobre la superficie terrestre (seca o húmeda). Desde el punto de vista de la reacción química hay una serie de factores que influyen en la reactividad que se da en esta parte de la atmósfera: Se estima que del gran número de especies emitidas a la troposfera desde la superficie de la tierra, aquellas cuyo tiempo de vida sea menor de un año se eliminan en la propia troposfera (12). Aunque la mayor parte de la radiación solar de mayor energía es absorbida por la estratosfera, a la troposfera llega radiación solar capaz de iniciar ciertas reacciones fotoquímicas.

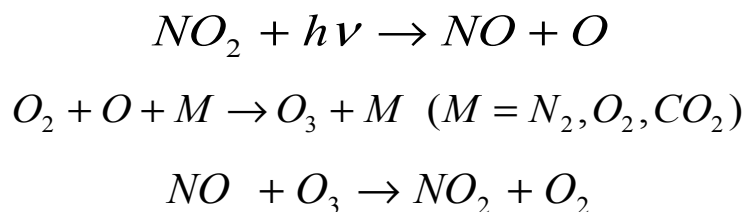
La composición es otro factor decisivo en la química de la troposfera. En la parte más baja de la troposfera, aparecen cientos de compuestos emitidos a la atmósfera por acción del hombre y de forma natural en concentraciones localmente altas. La composición allí va variando y aumentando su complejidad a medida que van apareciendo en ella una mayor diversidad de compuestos debido a la actividad humana.

La troposfera se caracteriza por ser un medio oxidante, la tendencia de las especies en ella presentes es la de reaccionar oxidándose. Las principales especies químicas oxidantes presentes en la troposfera y que van a determinar su química, son por un lado el radical hidroxilo (OH^\cdot), el radical nitrato (NO_3^\cdot) y el ozono (O_3). El radical OH^\cdot , de origen fotoquímico, dominará la química de la troposfera durante el día mientras el radical NO_3^\cdot que sufre fotólisis determinará la química durante la noche. Aunque la mayoría de los compuestos presentan una mayor reactividad con el radical OH^\cdot , que con el radical NO_3^\cdot , la mayor concentración de este radical (108 moléculas por cm^3 frente a 105 moléculas por cm^3 para el radical OH^\cdot) hace que los procesos reactivos del radical NO_3^\cdot sean decisivos en la química atmosférica.

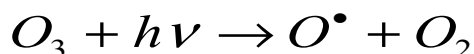
Muchos son los procesos que ocurren continuamente en la troposfera. Entre los más representativos se pueden mencionar a:

- 1) *Ciclo fotoquímico básico de NO_2 , NO y O_3 .*
- 2) *Fotólisis del ozono*
- 3) *Reacciones de NO_x .*

1) Ciclo fotoquímico básico de NO_2 , NO y O_3 . Está regido por las siguientes reacciones:



2) Fotólisis del ozono. Está regida por las siguientes reacciones:



3) Reacciones de NO_x . La principal reacción en la que se consumen NO_x durante el día son aquellas donde se producen ácido nítrico y ácido nitroso:

Contaminantes atmosféricos

Material Particulado (MP)

El Material Particulado presente en el aire, corresponde a partículas sólidas y líquidas que se encuentran en suspensión en la atmósfera y cuyos tamaños oscilan entre 2×10^{-4} y 5×10^2 μm . Debido a que son de diferente tamaño y forma, se han clasificado en términos de diámetro aerodinámico. En tal sentido, se agrupan en finas y gruesas.

Las partículas finas son las de diámetro aerodinámico menor o igual a $2.5 \mu\text{m}$, denominadas como $\text{MP}_{2.5}$. Otro grupo de partículas está constituido por aquellas cuyo diámetro aerodinámico se centra alrededor de las 10 micras, la cuales se denominan MP_{10} . Además, dentro de la clasificación se tienen las partículas suspendidas totales (PST) que se refiere a todas las partículas rodeadas por aire, en un determinado volumen de aire no perturbado (13).

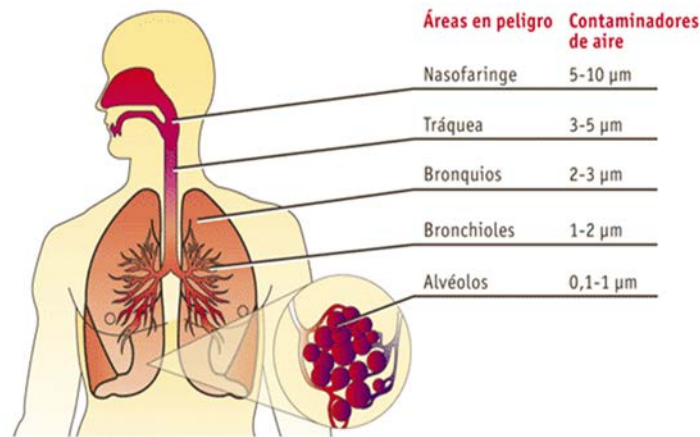


Figura 6: clasificación de MP por diámetro aerodinámico y su impacto en el sistema respiratorio.

La Figura 6 muestra la clasificación de las partículas y su impacto en el sistema respiratorio. Estas partículas se encuentran ampliamente repartidas en la atmósfera, y forman una suspensión estable en el aire. La composición química de las partículas depende de su origen y, generalmente, constituyen una mezcla de sustancias diversas, entre las cuales se puede mencionar: silicatos, carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, óxidos, metales, carbón, alquitrán, resinas, polen, hongos, bacterias, etc. Muchas provienen de procesos naturales y son transportadas debido a la acción del viento; como ejemplos se puede citar las cenizas derivadas de los incendios y erupciones volcánicas, los aerosoles formados por la acción del viento sobre los océanos y la turbulencia del mar, el polvo de los suelos secos sin cobertura vegetal y el polen, entre otros (Figura 7). Además, las partículas son originadas por una gran gama de procesos tecnológicos tales como la combustión de madera y de combustibles fósiles, y, el procesamiento de material sólido que incluye las etapas de reducción de tamaño, secado y transporte (3).

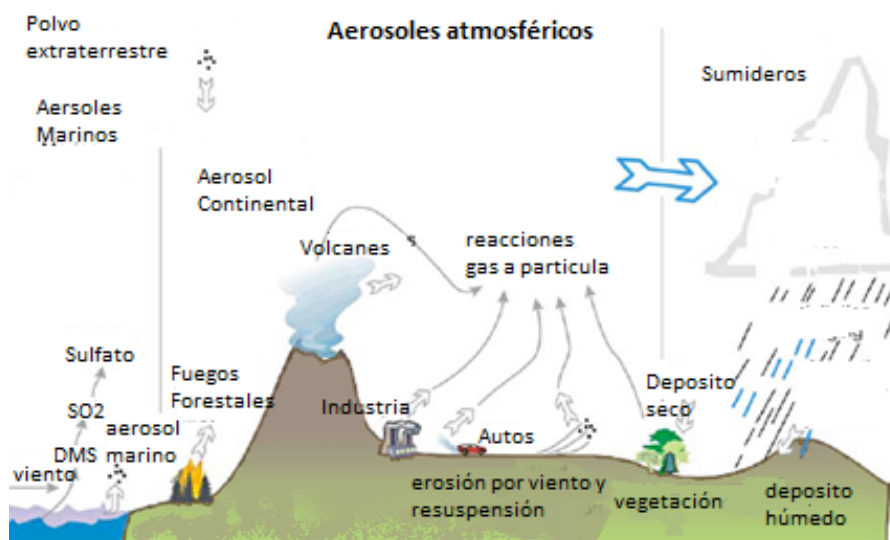
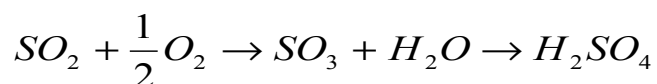


Figura 7: Fuentes de material particulado y aerosoles atmosféricos.

Compuestos de azufre

El dióxido de azufre (SO_2) y el trióxido de azufre (SO_3) son los principales óxidos de azufre presentes en la atmósfera. La principal fuente antropogénica de óxido de azufre es la combustión de combustibles fósiles ricos en azufre, como por ejemplo el carbón y el petróleo combustible, y representa cerca de un tercio del total del SO_2 atmosférico. El principal componente azufrado del carbón es la pirita, Fe_2S_3 , la que se oxida a Fe_2O_3 y SO_2 durante la combustión. Otras actividades industriales relevantes son las refinerías de petróleo y las fundiciones de minerales sulfurados (14).

El SO_2 es un gas no inflamable, no explosivo y es incoloro. En el aire, el SO_2 se oxida parcialmente en SO_3 y, en presencia de humedades altas, se transforma en ácido sulfúrico y sus sales, por medio de procesos fotoquímicos atmosféricos cuya reacción principal es:



Otro compuesto de azufre de relevancia ambiental es el sulfuro de hidrógeno (H_2S). El H_2S se produce a partir de la reacción del azufre con el hidrógeno en procesos industriales o naturales. Además, se genera como subproducto en la biodegradación anaeróbica en presencia de sulfatos. El H_2S tiene un fuerte olor a huevo podrido, que es detectado por el ser humano a muy bajos niveles de concentración, los cuales están alrededor de los $6 \mu\text{g m}^{-3}$. A concentraciones mayores es altamente tóxico y explosivo por lo que sus emisiones deben mantenerse bajo estricto control. En presencia de oxígeno se oxida a SO_2 .

Óxidos de Nitrógeno

Los tres óxidos de nitrógeno que se encuentran comúnmente en la atmósfera son el óxido nitroso (N_2O), el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2). Estos se denominan genéricamente NO_x . El N_2O es un gas relativamente poco reactivo y es un componente traza que se encuentra en la atmósfera naturalmente. El NO es un gas incoloro e inodoro; mientras que el NO_2 es marrón amarillento y tiene un olor desagradable (14).

Los óxidos de nitrógeno son producidos directa e indirectamente por procesos de combustión a altas temperaturas. En dichos procesos el N₂ presente en el aire se oxida para formar principalmente NO, el que se transforma en NO₂ mediante reacciones fotoquímicas. En las zonas urbanas, las concentraciones máximas de NO_x se presentan en las zonas con mayor tráfico. Los gases de escape de los motores de automóviles son ricos en NO y pobres en NO₂. Generalmente, una pequeña fracción del total de NO_x está presente como NO₂. Durante la mezcla inicial del aire con los gases de escape calientes, se oxida parte del NO a través de la siguiente reacción:



Gran parte del dióxido de nitrógeno atmosférico se convierte en ácido nítrico y sales de nitrato. Las sales de nitrato forman material particulado y/o sedimentan o son arrastradas por la lluvia.



Hidrocarburos

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) son compuestos orgánicos que se componen de anillos aromáticos simples, y son derivados de la combustión de material orgánico (quema de carbón, petróleo, gasolina, basura, tabaco, madera u otras sustancias orgánicas, como carne asada). Se pueden encontrar también en forma natural cuando son liberados por los incendios forestales y los volcanes. Principalmente, contienen al menos dos anillos aromáticos. Algunos de ellos son denominados "contaminantes prioritarios" por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos debido a su amplia distribución en el ambiente y por sus propiedades mutagénicas, carcinogénicas y teratogénicas (15, 16).

Las propiedades físicas y químicas de los HAPs de bajo peso molecular (dos a tres anillos aromáticos) hacen de ellos candidatos ideales para su dispersión a través de la atmósfera (17). En cambio los HAPs de mayor peso molecular (cuatro a siete anillos aromáticos), tienen mayor afinidad por el material particulado más persistente en el ambiente (18-20). En tal sentido, los HAP son contaminantes orgánicos persistentes (COPs).

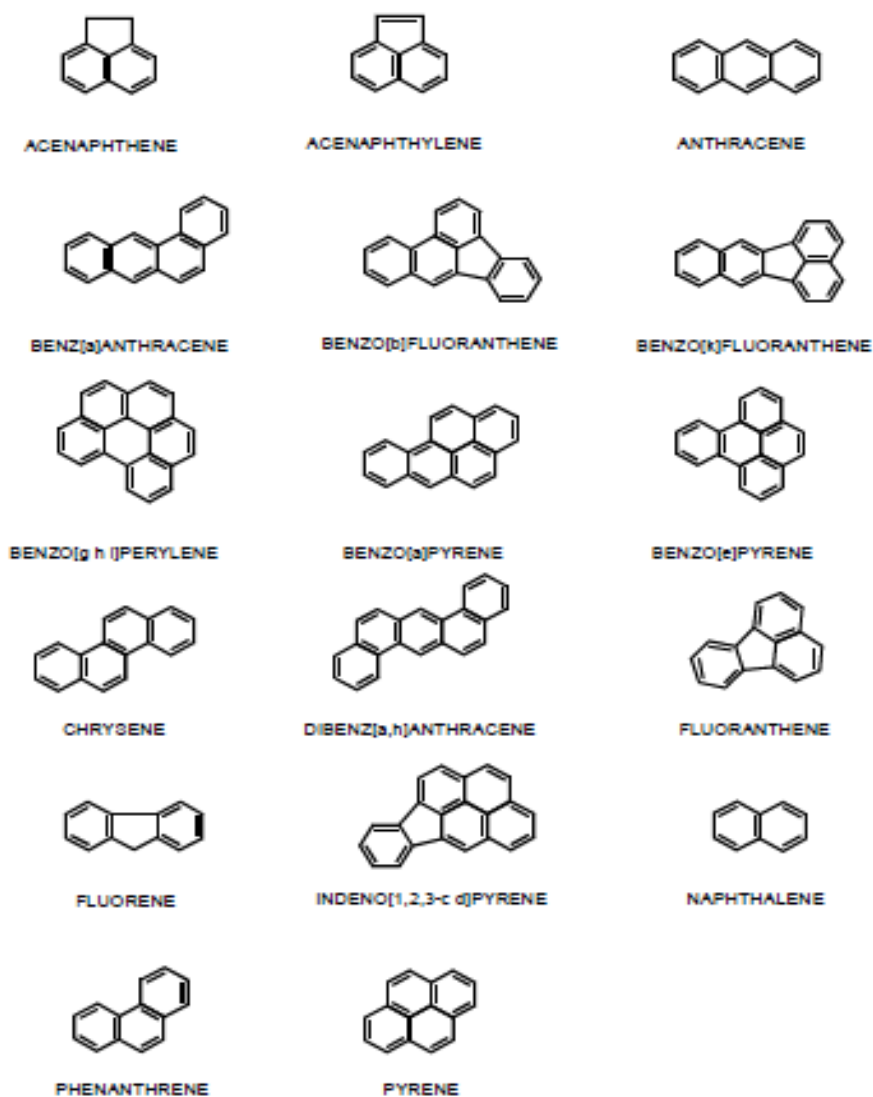
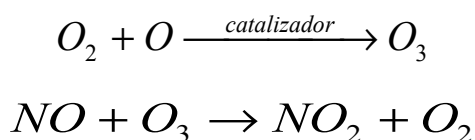


Figura 8. Estructuras de los principales HAPs

Además de los hidrocarburos de alto peso molecular, presentes en el material particulado, existe un amplio rango de compuestos orgánicos volátiles (COVs) destacándose aquellos que poseen entre 1 y 4 átomos de carbono, ya que se encuentran en estado gaseoso bajo condiciones ambientales normales. Los COVs son emitidos en la quema de combustibles, como gasolina, madera, carbón o gas natural. También son liberados por disolventes, pinturas y otros productos empleados y almacenados en hogares. Su importancia ambiental radica en su participación en las reacciones de oxidación fotoquímica. En dichas reacciones, los hidrocarburos se transforman en radicales libres generándose derivados aldehídos y otros compuestos oxidados como por ejemplo el formaldehído y el acetaldehído (14).

Oxidantes fotoquímicos

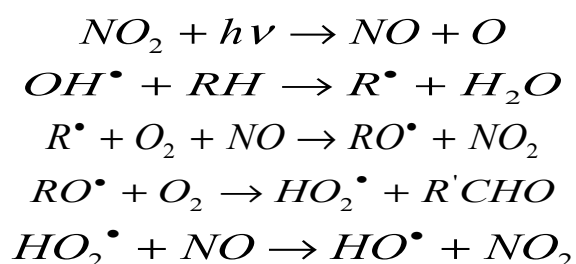
El ozono es uno de los oxidantes fotoquímicos más abundantes y se genera por la reacción entre el O_2 y el oxígeno atómico (O), en presencia de un catalizador que estabiliza la molécula de ozono. El ozono se consume reaccionando con el monóxido de nitrógeno y se forma nuevamente oxígeno:



El ozono es un foto-oxidante que se produce en la troposfera por efecto de la oxidación de monóxido de carbono e hidrocarburos en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar. De este modo, los hidrocarburos, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno constituyen precursores en la formación de ozono troposférico.

Por su parte, el oxígeno atómico se produce debido a la acción de la luz solar sobre el dióxido de nitrógeno. El oxígeno atómico es altamente reactivo y su interacción con el agua genera radicales hidroxilos, los que juegan un papel fundamental en los complejos procesos químicos atmosféricos. La formación de los hidroxilos se representa a continuación.

Los radicales hidroxilos reaccionan con los hidrocarburos (RH) para producir radicales libres de hidrocarburos (R[•]) en presencia de luz solar a longitudes de onda menores de 0,38 μm. Estas sustancias, a su vez, reaccionan con el NO para formar más NO₂. Lo anterior se representa en las siguientes ecuaciones:



El efecto neto de estas reacciones es que una molécula de hidrocarburo convierte dos moléculas de NO a NO₂ y produce una molécula de aldehído. Como se puede apreciar por cada molécula de NO₂ consumido se producen dos por lo que aumenta su concentración y disminuye la de NO.

Óxidos de carbono

Los óxidos de carbono están constituidos por el dióxido de carbono (CO₂) y el monóxido de carbono (CO). El CO₂ generalmente no se considera como contaminante atmosférico debido a que es un componente natural de la atmósfera donde juega un importante papel en el efecto invernadero. Sin embargo, en la actualidad existe gran preocupación por las crecientes emisiones de este gas, como producto de la combustión, que conllevan a un efecto adverso en el balance térmico terrestre.

Por su parte, el CO es un contaminante que proviene principalmente de la combustión incompleta de cualquier tipo de combustible. También es producido en grandes cantidades por muchas fuentes naturales como lo son los gases volcánicos, los incendios forestales y la oxidación del metano ambiental, entre otras. Los vehículos con motores de combustión interna son una de las principales fuentes de emisión de CO en las zonas urbanas.

Las chimeneas, las calderas, los calentadores de agua, estufas y otros aparatos domésticos que queman combustible también son fuentes importantes de CO tanto al aire libre como en ambientes interiores.

Ruido

El sonido representa la propagación de ondas de presión audibles a través de un medio. El ruido es un sonido indeseable, cuya intensidad, frecuencia y duración constituyen una molestia para las personas afectadas. El oído humano transforma estas ondas de presión en señal acústica con un umbral mínimo del orden de 20 µPa (micropascales).

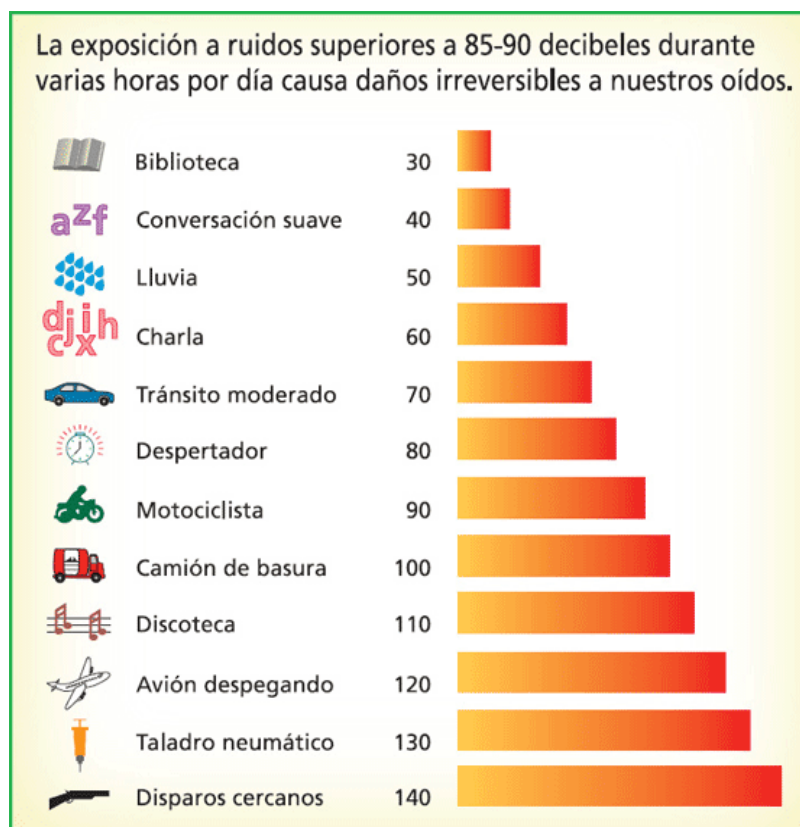


Figura 9. Escalas de ruido

El nivel de presión sonora (NPS) se define en términos del número de decibelios de presión acústica (P) en relación a una presión de referencia (P₀), generalmente de 20 µPa, usando la siguiente ecuación:

$$NPS = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

Los valores de NPS se encuentran entre 10 y 140 dB. El umbral del dolor corresponde a 140 dB, que corresponde por ejemplo al sonido de un motor a propulsión ubicado a una distancia de 25 m. Los camiones y otras maquinarias pesadas generan NPS del orden de 90 a 110 dB, mientras que una biblioteca típica presenta 40 dB.

La propagación del sonido en el aire depende del tipo de fuente sonora, del medio donde se propaga y de las condiciones atmosféricas entre las que se encuentran la dirección del viento, la presión y la temperatura.

Radiaciones ionizantes y no ionizantes

Las **radiaciones ionizantes** incluyen los rayos X, las partículas α y β , y los rayos γ . Estas radiaciones tienen serios efectos para la salud de las personas, debido a su poder para ionizar la materia que encuentra a su paso. Aun cuando existen fuentes de radiactividad naturales, las principales emisiones provienen de fuentes antropogénicas debido al uso y procesamiento de materiales radiactivos. Las centrales nucleares y las fábricas de material bélico son los principales usuarios de materiales radiactivos. Sin embargo, los usos difusos, tales como en medicina, instrumentos de laboratorio y análisis químicos son los principales responsables de emisiones “no controladas” de radiaciones ionizantes.

Las **radiaciones no ionizantes** incluyen aquellas generadas por líneas de transporte eléctrico, transformadores, antenas emisoras de telefonía, radio y televisión, radares, aparatos eléctricos, teléfonos móviles, teléfonos inalámbricos, electrodomésticos, etc.; dichas radiaciones dan lugar a lo que se denomina contaminación por campos electromagnéticos.

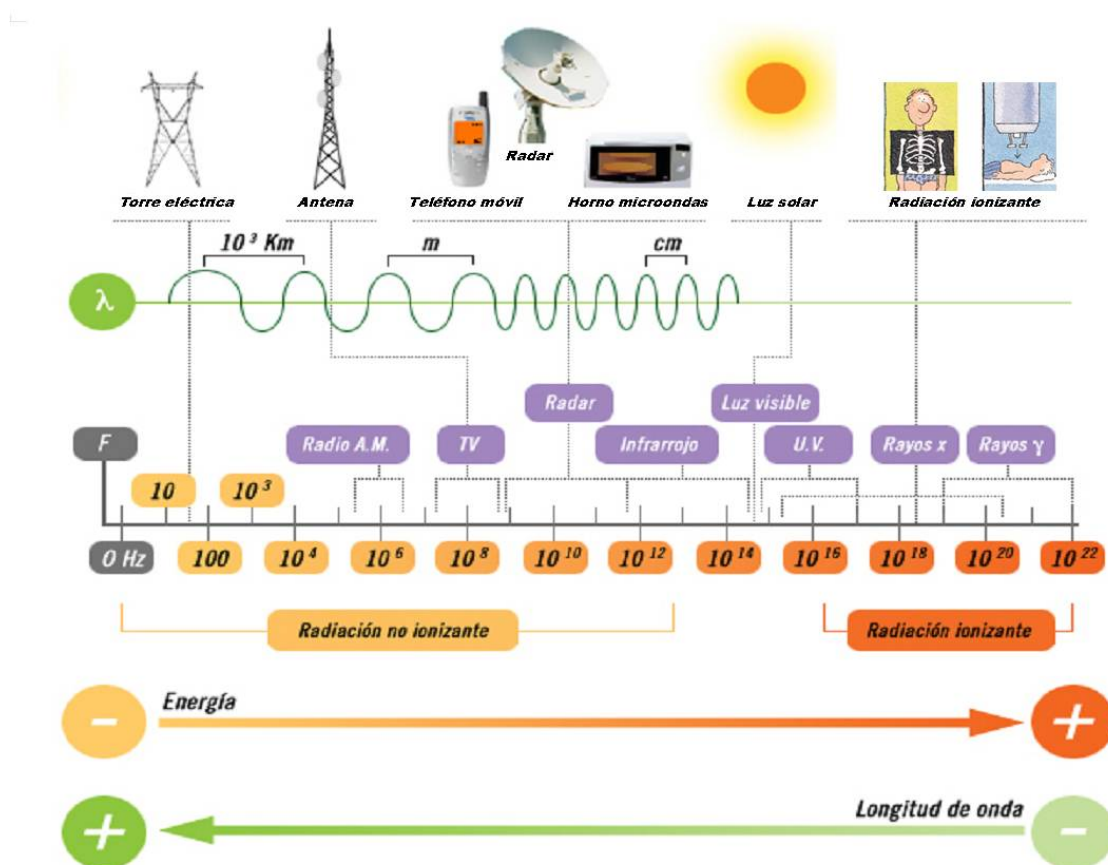


Figura 10. Tipo de radiaciones

Compuestos de cloro y bromo

Existen varios compuestos de este tipo que se emiten a la atmósfera en diferentes actividades. Se pueden citar a los bifenilos policlorados (PCB) que son un grupo de compuestos cuya fórmula general es $C_{12}H_{10}-XCl_x$, con diferentes niveles de sustitución. A pesar de que su estado normal es líquido se pueden encontrar presentes en los humos derivados de la combustión incompleta de polímeros clorados. Son muy tóxicos y de baja biodegradabilidad por lo que persisten en el ambiente por largo tiempo. Debido a su alta constante dieléctrica y baja presión de vapor se utilizan industrialmente como aislantes en condensadores eléctricos y transformadores.

Otros compuestos organoclorados de gran importancia, dado a su altísimo potencial tóxico, son las dioxinas y furanos. Constituyen una familia de compuestos aromáticos clorados tricíclicos. Las dioxinas presentan dos átomos de oxígeno en su molécula mientras los furanos solo presentan uno. Se conocen un total de 75 isómeros de dioxinas llamadas genéricamente policlorodibenzo-para-dioxinas (PCDD), y 135 isómeros de furanos llamados policlorodibenzofuranos (PCDF). Estos compuestos presentan una muy baja solubilidad en agua y tienen una bajísima presión de vapor por lo que son poco volátiles. Son químicamente estables a temperaturas menores de $850^{\circ}C$ y se descomponen con facilidad por acción de la luz en presencia de hidrógeno. Su gran estabilidad les permite resistir los ataques químicos y biológicos existentes en el suelo y en el agua, por lo que son altamente persistentes y bioacumulables (se van acumulando a lo largo de la cadena alimentaria, principalmente en el tejido adiposo de los animales por su solubilidad en las grasas). Su emisión a la atmósfera proviene de la combustión incompleta de compuestos orgánicos clorados como los plásticos clorados y la lignina clorada. También se generan en la reacción del Cl_2 y los compuestos fenólicos.

Los clorofluorocarbonos (CFC) son derivados de los hidrocarburos saturados obtenidos mediante la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de flúor y/o cloro principalmente.

Los CFC son una familia de gases que se emplean en diversas aplicaciones, principalmente en la industria de la refrigeración y de propelentes de aerosoles. Están también presentes en aislantes térmicos. Los CFC tienen una gran persistencia en la atmósfera, de 50 a 100 años. Con el paso del tiempo alcanzan la estratosfera, donde se disocian por acción de la radiación ultravioleta, liberando el cloro y dando comienzo al proceso de destrucción de la capa ozono. CFC es el nombre genérico de un grupo de compuestos que contienen cloro, flúor y carbono, utilizados como agentes que producen frío y como gases propulsores en los aerosoles. Sus múltiples aplicaciones, su volatilidad y su estabilidad química provocan su acumulación en la alta atmósfera, donde su presencia, según algunos científicos, es causante de la destrucción de la capa protectora de ozono.

Respecto a compuestos bromados, el bromometano (o bromuro de metilo) es el principal contaminante que aporta bromo a la atmósfera. Es un compuesto orgánico halogenado con la fórmula química CH_3Br . Es un gas incoloro, con suave aroma a cloroformo, ininflamable. Sus propiedades químicas son bastante similares a las del clorometano. El bromuro de metilo tiene origen tanto natural como sintético. Se produce naturalmente en su mayoría en el océano, por algas y algas Laminariales.

También por plantas terrestres, como varias del género de las Brassica. En la industria se hace reaccionando metanol con ácido bromhídrico. En el laboratorio se obtiene añadiendo sulfúrico a una mezcla metanol y bromuro de sodio (se forma bromhídrico), o bien por reacción del bromo con metanol en presencia de fósforo rojo.

Metales pesados

Los metales pesados se encuentran en la atmósfera como material particulado. Algunos metales y sus compuestos, tales como el mercurio y el tetraetilo de plomo, poseen una alta presión de vapor por lo que pueden presentarse en estado gaseoso. En este grupo de contaminantes se incluyen además los siguientes metales: cadmio, cromo, cobre, zinc y arsénico. En general, son persistentes y bioacumulables en los seres vivos, y algunos también biomagnificables.

Por su parte, el arsénico y el cadmio se han vuelto una preocupación en algunas ciudades o regiones que se emplazan cerca de industrias que procesan el metal tales como operaciones mineras y fundiciones. En contraste a compuestos gaseosos específicos, la evaluación de los compuestos de metales y metaloides en el aire ambiente es complicada por el hecho de que las diferentes especies químicas podrían poseer diferentes toxicidad. En el aire ambiente, los metales, metaloides y sus compuestos se encuentran principalmente como parte del material particulado a pesar de que las especies químicas volátiles podrían ser las más tóxicas. Pueden estar presentes en la fase no soluble o como compuestos iónicos solubles u organometálicos. Adicionalmente, las especies químicas gaseosas específicas y los vapores podrían también estar presentes en el aire. Bajo ciertas condiciones ambientales, los compuestos metálicos se pueden encontrar en formas gaseosas tales como organometálicos moleculares de bajo peso. Como ejemplo, los compuestos de arsénico más comúnmente encontrados en el aire ambiente incluyen al trióxido de arsénico, al óxido de arsénico, al ácido arsénico (ácido ortoarsenico), ácido monometilarsonico, dimetilarsínico ácido, y otras trivalentes como compuestos de arsina (H_3As) siendo las especies más tóxicas.

En el caso del As, se sabe que el aumento de la estructura orgánica de los compuestos de arsénico reduce fuertemente su toxicidad, lo que proporciona una manera natural de desintoxicación del As. Sin embargo, en el caso de Hg, la toxicidad de sus especies químicas aumenta desde la de mercurio inorgánico a compuestos metilo y fenilos que pueden cruzar las barreras de la membrana celular con facilidad. El estado de oxidación es también un factor clave para ser considerado en la evaluación de la toxicidad de los elementos minerales, así como, como un ejemplo de compuestos de Cr (III) son menos tóxico que el Cr (VI) y tienen un efecto totalmente diferente en los seres humanos.

Asbestos

El asbesto es otro contaminante atmosférico importante. Asbesto es el nombre general de un grupo de minerales fibrosos, todos los cuales son básicamente silicatos hidratados. Estos varían en el contenido metálico, en la resistencia al calor y en otras propiedades.

Estas variaciones determinan los usos industriales de los diferentes tipos de asbesto e influyen en sus efectos biológicos. Una exposición crónica durante varios años produce una enfermedad caracterizada por dificultades severas al respirar conocida como asbestosis.

Partes de las fibras inhaladas se fijan firmemente en el tejido pulmonar; la reacción natural del organismo consiste en cubrir estas fibras formando cuerpos asbestosos. La inhalación excesiva de las fibras produce una formación progresiva de tejido fibroso que eventualmente cubre gran parte de los pulmones.

La principal causa de muerte entre trabajadores de la industria del asbesto es el cáncer pulmonar. Se debe tener en consideración que el asbesto-cemento es muy utilizado en la construcción de viviendas. En la actualidad, se sabe que una exposición moderada a polvos de asbesto-cemento aumenta el riesgo de cáncer al pulmón en 10 veces, comparado con la población general. En personas fumadoras el riesgo aumenta en 90 veces.

Metano

El metano (CH₄) se encuentra presente naturalmente en la atmósfera y se genera a partir de los procesos biológicos anaeróbicos como los llevados a cabo en los sedimentos de los cuerpos de agua superficiales, pantanos, en los intestinos de los rumiantes y en otros medios anóxicos. Los sitios de disposición final de residuos biodegradables emiten metano generado por la acción de bacterias anaeróbicas. El metano se oxida en la atmósfera a CO₂.

Clasificaciones de contaminantes

Los contaminantes atmosféricos son tan numerosos que resulta difícil agruparlos para su estudio. Algunos autores lo hacen en función de sus formas de tratamiento, tales como particulado y gaseosos, aun considerando que la calidad del aire puede ser degradado por otros contaminantes tales como ruido, calor, radiación ionizante y campos electromagnéticos. Hoy en día, la contaminación del aire típicamente se refiere a un conjunto de contaminantes criterio, que históricamente fueron designados como tales debido a sus impactos sobre la salud humana y más tarde a sus efectos sobre los ecosistemas. En este aspecto, la mayoría de los contaminantes atmosféricos pueden afectar directamente la salud de las personas, ya que ingresan al organismo a través del sistema respiratorio o de la piel. En otros casos, el contaminante es transportado desde el aire al suelo o a los cuerpos hídricos, donde posteriormente ingresa en la cadena trófica. El transporte de contaminantes desde la atmósfera hacia la superficie terrestre se produce por sedimentación de las partículas del aire y/o por absorción y arrastre de las lluvias.

Primarios y secundarios

Los contaminantes atmosféricos primarios son aquellas sustancias que se emiten directamente al aire de una fuente de emisión, y resultan en su forma perjudiciales; mientras que los contaminantes secundarios no se emiten directamente a la atmósfera desde focos emisores.

Estos últimos se forman en el seno de la misma a través de los procesos químicos y/o fotoquímicos que sufren los contaminantes primarios, y en varios casos son los causantes directos de los problemas de contaminación más acuciantes, como es el caso del ozono troposférico.

Ejemplos de contaminantes atmosféricos primarios incluyen CO, SO₂, y material particulado suspendido que puede ser generado por fuentes naturales, como partículas del suelo, o actividades humanas tales como el transporte, la calefacción o las industriales. Por otro lado, los contaminantes secundarios del aire se forman en la atmósfera como resultado de la hidrólisis, la oxidación y/o la oxidación fotoquímica, y ejemplos de ellos incluyen a nieblas ácidas y oxidantes fotoquímicos. Otros contaminantes secundarios de relevancia, son el ácido sulfúrico (H₂SO₄), que se forma por la oxidación del SO₂, el dióxido de nitrógeno NO₂, que se forma al oxidarse el contaminante primario NO y el O₃, que se forma a partir del oxígeno O₂. Por lo expuesto, se puede concluir que la acción principal para evitar la contaminación del aire es controlar las emisiones de las fuentes de contaminantes primarios poniendo especial atención a las fuentes antropogénicas que se verán drásticamente potenciadas por el incremento de la población humana y las actividades relacionadas con el desarrollo económico.

Tabla 6. Contaminantes primarios y secundarios en función del tipo de compuesto

TIPO	Contaminante Primario	Contaminante Secundario
Compuestos de S	SO ₂ , SH ₂	SO ₃ , H ₂ SO ₄ , MSO ₄
Compuestos de N	NO, NH ₃	NO ₂ , MNO ₃
Compuestos Orgánicos de C	Compuestos C1-C7	Aldehídos, cetonas, ácidos
Óxidos de C	CO, CO ₂	-----
Compuestos Halógenos	HF, HCl	-----

Criterio y no criterio

Contaminantes **criterio** atmosféricos se refieren a un conjunto de contaminantes que permiten definir la calidad del aire. Su nombre se debe a que han sido objeto de evaluaciones sobre estándares de calidad del aire en los Estados Unidos, con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población (13). A la actualidad esta clasificación ha sido adoptada por muchos países, e incluye a:

- material particulado
- ozono troposférico
- monóxido de carbono
- dióxidos de azufre
- dióxidos de nitrógeno
- plomo

La principal diferencia entre los contaminantes **criterio** y **no criterio** es que los primeros han sido estudiados extensivamente y existe amplia información sobre sus fuentes de emisión, niveles en el ambiente e impactos en la salud mientras que los no criterio han comenzado a ser estudiados más recientemente y no cuenta con información tan amplia. Además, los contaminantes criterio han sido utilizados como indicadores durante varias décadas estimando que, de estar éstos dentro de valores aceptables, el resto de los contaminantes no debería aparecer en exceso. Sin embargo, en la actualidad no es totalmente aceptada esta premisa ya que existen procesos químicos que liberan contaminantes peligrosos sin emitir ninguno de los criterio (13).

Los contaminantes no criterio en pequeñas concentraciones en la atmósfera pueden presentar impactos agudos y crónicos significativos en la salud. Entre los contaminantes atmosféricos no criterio se pueden citar a los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y a los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). La US.EPA reúne en una lista a 187 contaminantes atmosféricos peligrosos, incluidas las sustancias que causan cáncer y efectos neurológicos, respiratorios y reproductivos. Estos contaminantes son a menudo llamados contaminantes tóxicos del aire. El riesgo de estos contaminantes en particular, depende de su toxicidad intrínseca, de la concentración y de la duración de la exposición. Algunos ejemplos de contaminantes peligrosos del aire incluyen al benceno, que se encuentra en la gasolina; el percloroetileno, que se emite desde algunas instalaciones de limpieza en seco; y cloruro de metileno, que se utiliza como separador de disolvente y pintura en industrias. Otros ejemplos relevantes en esta lista son las dioxinas, el amianto, el tolueno, y metales tales como el cadmio, mercurio, cromo y compuestos de plomo.

Emergentes

Los contaminantes emergentes pueden definirse en términos generales como los productos químicos o microorganismos que no se controlan comúnmente en el medio ambiente, pero que han sido detectadas en el aire. Sin embargo, en esta sección, debemos incluir dos diferentes tipos de contaminantes emergentes: (1) los contaminantes que aparecieron en la atmósfera recientemente y (2) los que han estado en el ambiente desde ya hace tiempo pero que la preocupación por ellos se han vuelto reciente, en algunos casos relacionados con la disponibilidad de nuevos métodos analíticos de alta sensibilidad, adecuados para explicar la relación entre la concentración molecular en el aire y los efectos perjudiciales para la salud.

Los principales grupos de contaminantes emergentes son los ftalatos, los pesticidas, los retardadores de llama y las nanopartículas manufacturadas.

Los ésteres de ftalato son ampliamente utilizados como plastificantes en la producción de materiales polímeros tales como policloruro de vinilo (PVC). El PVC y el plastificante no están químicamente unidos y, por lo tanto, el plastificante puede vaporizar o lixiviar productos de PVC. El amplio uso de PVC como material de construcción es la principal razón por la que el aire interior puede ser contaminado por los ésteres de ftalato. Algunos de los ésteres de ftalato son conocidos teratógenos. El caso de los retardantes de llama, tales como ésteres de fosfato, es similar a la de los ésteres de ftalato y estos compuestos pueden ser lixiviados al aire interior.

Los ésteres de fosfato se han tenidos en cuenta a causa de la toxicidad aguda del sistema nervioso central. El caso de las nanopartículas es bastante difícil: nanopartículas se definen a aquellas partículas que tienen al menos una dimensión que es menor que 100 nm. Por lo tanto, se pueden subdividir en nanopartículas basadas en carbono, tales como nanotubos de carbono, nanocuernos, nanocables o fullerenos, y así sucesivamente y nanopartículas a base de metal, tales como las nanopartículas de metales nobles, óxidos metálicos o puntos cuánticos. Además de los problemas de la dificultad del muestreo, el reto en la evaluación del medio ambiente o riesgos para la salud humana de las nanopartículas es distinguir entre la toxicidad debida a la composición y el tamaño de las partículas consideradas. Las nanopartículas a base de carbono se comportan en parte como compuestos orgánicos pesados y en parte como pequeñas partículas. Por otra parte, las nanopartículas a base de metal también deben ser evaluadas en términos de los componentes metálicos de la nanopartícula que están disueltos en los diferentes medios considerados, y en comparación, por los problemas intrínsecos relacionados con la toxicidad de la propia nanopartícula.

Hoy en día, el uso prolongado de catalizadores de motor, junto con la incorporación de nanomateriales en la ropa, en los embalajes y en los productos industriales han aumentado dramáticamente la presencia de partículas pequeñas en ambientes de interiores y exteriores, y hasta ahora no hay demasiados datos disponibles sobre su verdadera movilidad de distribución y los posibles efectos tóxicos sobre el sistema respiratorio.

Fuentes de contaminación atmosférica

La contaminación del aire incluye elementos de origen natural y emisiones resultantes de actividades humanas. Aunque los programas regulatorios se centran exclusivamente en la contaminación del aire antropogénico, es importante entender que la naturaleza contribuye a la contaminación atmosférica y, en algunos eventos, causa problemas significativos de calidad del aire.

Naturales

Las emisiones de contaminantes naturales varían de un lugar a otro, de acuerdo a las condiciones estacionales, geológicas y meteorológicas, y con el tipo de vegetación presente. Asimismo, las actividades humanas pueden contribuir también a crear condiciones propicias que aumentan la proporción de contaminantes de fuentes naturales, por ejemplo la deforestación /quema de suelos sin restauración inmediata. Las fuentes de emisión naturales pueden clasificarse en biogénicas (relacionados con los seres vivos) y los geogénicos (relacionados con procesos geológicos).

- **Fuentes geogénicas:** Las erupciones volcánicas representan una fuente natural concentrada y localizada de todo tipo de gases y partículas. Asimismo, el polvo y las partículas de la superficie que se arrastran durante los períodos de mucho viento pueden ser transportadas a grandes distancias y dar origen a altas concentraciones de partículas durante períodos breves en regiones remotas. Los incendios forestales también constituyen fuentes importantes de partículas, CO y CO₂, y los bosques vivos lo son de

COVs muy reactivos. Esta fuente es tan intensa que es detectable por el olfato y la vista, y las emisiones se producen sobre áreas muy amplias.

- Fuentes biogénicas: Las plantas emiten COVs, entre los que se incluyen compuestos oxigenados, como los aldehídos y cetonas, compuestos cíclicos y lineales generalmente insaturados, siendo el isopreno y terpenos los compuestos predominantes (21).

Otras fuentes naturales incluyen a los relámpagos que están asociados con la formación de NO_x, las termitas por sus emisiones de CH₄, los volcanes en referencia a las emisiones de SO_x.

Antropogénicas

Las exigencias en mejorar la calidad de vida del ser humano y las concentraciones de población en áreas urbanas, junto a la falta de políticas públicas, constituyen elementos que conducen a la sostenida contaminación de los recursos. En este aspecto, los contaminantes que el hombre libera hacia la atmósfera, podrían clasificarse en cuatro grupos principales:

- **Fuentes domésticas:** Constituyen la principal causa de emisión de contaminantes en áreas residenciales. Algunos ejemplos se muestran en la Tabla 7 (22).

Tabla 7. Actividades domésticas y tipo de contaminantes atmosféricos que emiten (22).

Actividad	Contaminantes atmosféricos emitidos
Calentamiento de espacios	CO, CO ₂ , NO _x , SO _x , Hollín, humo
Cocina	Grasas en estado sólido, líquido, gaseoso; partículas y olores
Limpieza	Vapores de disolvente, polvo, pelusa, propelentes
Jardinería	Plaguicidas, fertilizantes
Pintura	Vapores de disolvente
Lavado de ropa	Partículas de detergente y jabón, pelusa

Antes de la revolución industrial, el fuego doméstico era la fuente de contaminación más importante en Londres; el problema se amplificaba por el hecho de que las emisiones provenían de chimeneas bajas y los hogares contaban con sistemas de combustión y calefacción notoriamente ineficientes. Los sistemas de combustión domésticos modernos son más eficientes pero predominan las descargas de emisiones a baja altura.

- **Fuentes comerciales:** Un ejemplo de ello lo constituyen las tintorerías en cuyo proceso casi todo el disolvente que se utiliza se evapora y entra a la atmósfera. Las emisiones por lavado en seco rondan entre 10 y 16% de disolvente perdido. El disolvente que se utiliza en casi todas las máquinas pequeñas de limpieza comercial es el percloroetileno, un hidrocarburo clorado (22). Otros establecimientos o actividades comerciales que liberan contaminantes en la atmósfera incluyen restaurantes, hoteles, talleres de autos, escuelas, imprentas y talleres de pintura.

- **Fuentes industriales:** Las fuentes industriales de contaminantes atmosféricos son las más notorias porque en general las emisiones son concentradas. Una fuente usual de NO_x son los procesos de combustión; otra fuente de estos contaminantes son las fábricas de fertilizantes nitrogenados y las fábricas de explosivos. Los SO_x también se producen en los procesos de combustión, especialmente cuando se usa carbón. Otra fuente de SO_x son los procesos de refinación de minerales sulfurados, las fundidoras no ferrosas y las refinerías de petróleo. El sulfuro de hidrógeno se emite en grandes cantidades en las fábricas de papel, las plantas de limpieza y el procesamiento de gas natural, las refinerías de petróleo, industrias de fibras sintéticas y plantas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. El H₂S se oxida en cuestión de horas en la atmósfera para formar SO₂ y H₂O. El CO se emite en concentraciones altas en la producción de hierro colado y en otros procesos metalúrgicos donde es deseable reducir al mínimo la presencia de oxígeno. Los procesos de combustión también generan CO, en diferentes cantidades dependiendo de la eficiencia del proceso. Los COVs por su parte, se originan en una multitud de procesos industriales que por lo general tienen relación con las industrias del petróleo y del gas natural, o con industrias que utilizan sus productos como la de pinturas. Asimismo, es considerable la cantidad de emisiones de COVs en las plantas que fabrican plásticos, la mayor parte de los cuales utiliza derivados de petróleo o de gas natural como productos base, y en las instalaciones de manufactura o procesamiento de caucho o materiales sintéticos. Los óxidos metálicos (de la aplicación de pintura por aspersión y de las industrias de recubrimientos), el polvo (de catalizadores de las refinerías), las fibras de asbesto (de las industrias de aislantes), las fibras (de la industria textil) y el polvo metálico (de las industrias de procesamiento de metales), entre otros, se catalogan como partículas peligrosas porque son muy tóxicas o carcinógenas y su tamaño puede estar en el intervalo respirable. Las emisiones de MP de mayor tamaño son las cenizas de la combustión de carbón, derivados del petróleo y residuos así como el MP generado en las canteras y mineras.
- **Fuentes relacionadas con el transporte:** El CO y los COVs son productos de una combustión ineficiente, los cuales se eliminarían si la combustión fuera completa. La mayor parte de las emisiones de COVs proceden del caño de escape. Estas pueden ser controladas utilizando reactores catalíticos e inyectando aire en los puertos de escape del motor para quemar los hidrocarburos que se emiten en esta zona de alta temperatura. Alrededor del 20% de las emisiones de COVs no controladas de los motores de automóvil provienen del respiradero del escape de gases de los cilindros y aceite lubricante evaporado, o cárter, y del desfogue del carburador a la atmósfera. Estas emisiones se controlan utilizando un tubo de desfogue del cárter conectado al conducto de toma de aire del motor y una unidad de absorción para las pérdidas por evaporación. A partir de 1985 los sistemas de inyección de combustible comenzaron a tomar el lugar de los carburadores; estos sistemas proporcionan una dosificación más precisa de combustible para los cilindros y una reducción significativa en la emisión de contaminantes. En la actualidad se promueve el uso de combustibles oxigenados o de alto octanaje para reducir las emisiones de COVs en el caño de escape (22). Durante la combustión en los vehículos

se presenta formación de NO_x y su producción aumenta con gran rapidez con la temperatura de combustión; para disminuir este efecto se cambió el diseño de los motores para bajar la temperatura de los cilindros, principalmente reduciendo la relación de compresión del motor, modificando la sincronización del encendido, introduciendo la recirculación de gases de escape y utilizando una combustión en dos etapas. Un contaminante atmosférico que causaba gran preocupación y que generaba el sector transporte era el plomo, afortunadamente esto se ha modificado desde que se expenden las gasolinas sin plomo.

Fijas y móviles

Entre las diferentes fuentes de emisiones a la atmósfera podemos distinguir dos grandes tipos: las fuentes fijas y las móviles.

- **Fuentes fijas:** Aquellas que operan en un punto fijo (el foco de emisión no se desplaza en forma autónoma en el tiempo). Ejemplo de este tipo de fuentes son las chimeneas industriales y domésticas. La Ley Nacional 20.284/73- Rep. Argentina, las define como todas las fuentes diseñadas para operar en lugar fijo, que no pierden su condición de tales aunque se hallen montadas sobre un vehículo transportador a efectos de facilitar su desplazamiento. Las fuentes fijas se pueden clasificar, de acuerdo a la envergadura y distribución espacial de las emisiones en:

- **Fuente puntual:** un único punto fijo, desde donde los contaminantes pueden emitirse a la atmósfera de forma continua o instantánea (Ej. Durante una emisión accidental). Un ejemplo típico de fuente puntual es una chimenea.

- **Fuentes de área:** emisión de los contaminantes atmosféricos desde un área específica (por ejemplo, una ciudad o un incendio forestal). En un inventario de emisión, las fuentes de área pueden hacer referencia a un país o una región (Ej. Cuadrícula regular).

- **Fuentes de línea:** generalmente se refiere a las emisiones procedentes del transporte a lo largo de una línea (Ej. Emisiones de los vehículos por carretera, ferrocarriles circulando por vías, rutas de aviación, barcos navegando en canales, etc.).

Las estaciones de servicio y los establecimientos de lavado en seco con frecuencia son tratados como fuentes de área. Tales establecimientos, generalmente, no son incluidos en los inventarios de fuentes puntuales debido al enorme esfuerzo que sería necesario para recopilar los datos y estimar las emisiones de cada establecimiento a nivel individual.

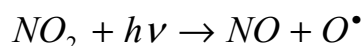
- **Fuentes móviles:** Son las que pueden desplazarse en forma autónoma, emitiendo contaminantes en su trayectoria; ejemplos de este tipo de fuente son los automóviles, trenes, camiones, buses, aviones y barcos, entre otros. En la mayoría de las áreas urbanas, los vehículos automotores son los principales generadores de los contaminantes atmosféricos. La mayor parte de los sistemas de transporte actual, obtienen su energía por medio de la combustión de diversos productos lo que origina diferentes compuestos que son emitidos a la atmósfera. Los motores de combustión interna constituyen una de las principales fuentes emisoras de contaminantes atmosféricas tales como CO ,

hidrocarburos, aldehídos, NO_x, SO₂, partículas en suspensión, Pb y derivados. La proporción en que se emiten estos contaminantes depende de una serie de factores entre los que se encuentran el tipo de motor, el combustible usado y el estado de mantenimiento del vehículo. La Ley Nacional 20.284/73- Rep. Argentina, las define como aquellas fuentes capaces de desplazarse entre distintos puntos, mediante un elemento propulsor (motor) que genera y emite contaminantes.

Efectos de la contaminación atmosférica

Reacciones de fotoionización y foto disociación en la atmósfera.

De acuerdo con la ley de Planck, la energía de un fotón de frecuencia ν es $h\nu$. En la fotoquímica atmosférica, el fotón que es un reactivo en una reacción química se escribe como $h\nu$ por ejemplo, para la fotólisis de NO₂,



La energía de los fotones puede expresarse por mol de una sustancia multiplicando $h\nu$ por el número de Avogadro, $6,022 \times 10^{23}$ moléculas mol⁻¹:

$$E = 6,023 \times 10^{23} h\nu$$

$$E = 6,023 \times 10^{23} \frac{hc}{\lambda}$$

La energía asociada con una longitud de onda particular λ (nm) es la siguiente,

$$E = \frac{1,19625 \times 10^{25}}{\lambda} \text{ kJmol}^{-1}$$

Los rangos típicos de longitudes de onda y energías en la porción del espectro electromagnético de interés en la química atmosférica son (tabla 8):

Tabla 8: valores de longitud de onda y energía típicos

	λ (nm)	E(kJmol ⁻¹)
Visible		
Rojo	700	170
Naranja	620	190
Amarillo	580	210
Verde	530	230
Azul	470	250
Violeta	420	280
Ultravioleta cercano	400-200	300-600
Ultravioleta (vacío)	200-50	600-2400

Las energías de los fotones pueden ser comparados con energías de enlace de las moléculas. La energía contenida en los fotones de longitudes de onda cercanas al extremo rojo

del espectro visible es comparable a las energías de enlace de las especies químicas en lugar débilmente unido.

Por ejemplo, en la molécula de ozono, la energía de enlace O-O₂ es de aproximadamente 105 kJ mol⁻¹; en NO₂, el NO-O la energía de enlace es de aproximadamente 300 kJ mol⁻¹ (que corresponde a una longitud de onda de aproximadamente 400 nm).

Los fotones de energía más bajos que son capaces de promover las reacciones químicas se encuentran en la región visible del espectro electromagnético. Las longitudes de onda a la que puede producirse un cambio químico corresponden aproximadamente a las energías a la que las transiciones electrónicas en las moléculas tienen lugar. La absorción de la radiación puede ocurrir sólo si existe un nivel de energía superior de la molécula que se separa desde el nivel inferior por una energía igual a la del fotón incidente. Las moléculas pequeñas generalmente exhiben absorción electrónica intensa en longitudes de onda más corta que moléculas más grandes. Por ejemplo, N₂ y H₂ absorben significativamente a longitudes de onda de menos de 100 nm, mientras que O₂ absorbe fuertemente para » <200 nm, H₂O para » <180 nm, y de CO₂ para » <165 nm.

El primer paso de una reacción fotoquímica puede escribirse:

Quando A es un estado electrónicamente excitado de la molécula de A. La molécula excitada A* puede participar posteriormente en diferentes reacciones:

- | | | |
|----|----------------------------|--|
| 1) | Disociación | A* → B ₁ + B ₂ |
| 2) | Reacción Directa | A* + B → C ₁ + C ₂ |
| 3) | Fluorescencia | A* → A + hν |
| 4) | Desactivación por colisión | A* + M → A + M |
| 5) | Ionización | A* → A ⁺ + e ⁻ |

El rendimiento cuántico para un proceso específico que implica A* se define como la relación entre el número de moléculas de A* que participan de ese proceso y el número de fotones absorbidos. Dado que el número total de moléculas A* formados es igual al número de fotones absorbidos, el rendimiento cuántico Ø_i para un proceso específico i, por ejemplo, la disociación, es sólo la fracción de las moléculas de A que participan en el proceso i. La suma de los rendimientos cuánticos para todos los procesos posibles debe ser igual a 1.

La velocidad de formación de A* es igual a la tasa de absorción de fotones y se escribe:

$$\frac{d[A^*]}{dt} = j_A[A]$$

Donde j_A, que tiene unidades de s⁻¹, es la constante de velocidad de primer orden para la fotólisis o la denominada tasa de absorción específica. La velocidad de formación de B₁ en el paso 1 es:

$$\frac{d[B_1]}{dt} = \Phi_1 j_A[A]$$

Donde Ø₁ es el rendimiento cuántico de la etapa 1.

La fotodisociación de una molécula puede ocurrir cuando la energía del fotón entrante excede la energía de enlace del enlace químico particular. Así, la especie excitada A^* puede encontrarse con energía por encima del umbral de disociación de la molécula. Uno o más de los productos de fotodisociación pueden ser ellos mismos electrónicamente excitados.

La Figura 11 muestra la irradiancia solar (potencia incidente por unidad de superficie) en la parte superior de la atmósfera y al nivel del mar. Los espectros de absorción son bastante complejos, pero indican que la absorción es tan fuerte en algunas regiones espectrales que no hay energía solar de esas regiones que llega a la superficie de la Tierra. La absorción de O_2 y O_3 es responsable de la eliminación de prácticamente toda la radiación incidente con longitudes de onda más cortas que 290 nm. Por otro lado, la absorción atmosférica no es fuerte de 300 a alrededor de 800 nm, la formación de una "ventana" en el espectro. Alrededor del 40% de la energía solar se concentra en la región de 400-700 nm. El vapor de agua absorbe de una manera complicada, y en su mayoría en la región donde se solapan la radiación de la Tierra y del Sol. De 300 a 800 nm, la atmósfera es esencialmente transparente. De 800 a 2000 nm, la radiación de onda larga terrestre está moderadamente absorbida por el vapor de agua en la atmósfera.

Fig. 15

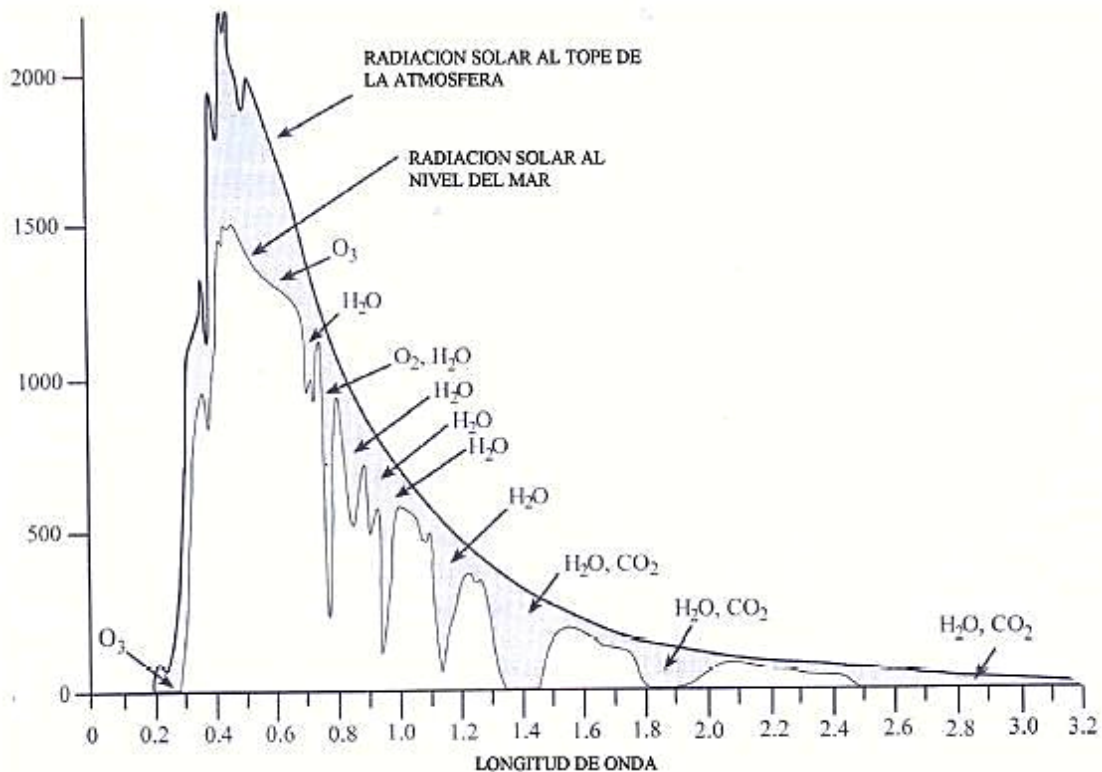


Figura 11. Irradiancia solar en la parte superior de la atmósfera y al nivel del mar

Química de la estratosfera

La atmósfera terrestre se divide en una serie de capas caracterizadas por cómo varía la temperatura en su seno. La troposfera es la de más interés en ecología ya que forma parte de la biosfera. Es donde vuelan las aves, donde se generan las nubes, donde se producen las lluvias, los vientos, los rayos y relámpagos, los cambios de temperatura en función de los importantes movimientos verticales de las masas de aire. El límite superior de la troposfera es variable: unos 9 Km en los polos y unos 18 en el ecuador. En esta capa, la temperatura del aire disminuye mucho con la altura.

La estratosfera es la capa que existe justo encima, hasta unos 50 Km. En ella, la temperatura aumenta con la altura hasta llegar a unos cero grados centígrados. En esta capa los movimientos verticales son mucho menos importantes que los horizontales, que pueden llegar hasta los 200 Km por hora. Es por eso que los aviones comerciales suelen volar en esta zona. En esta capa, por tanto, se puede difundir un contaminante muy rápidamente, justo lo que pasa con los CFCs que destruyen el ozono.

El ozono se encuentra mayoritariamente entre los 15 y los 35 Km de altura (figura 12). Su concentración en la atmósfera se mide en Unidades Dobson (UD), que equivale a un espesor de 0.01 mm de ozono puro a la densidad que tendría si se encontrase a la presión de 1 atm y a cero grados centígrados. La cantidad media de ozono en la atmósfera es de 350 UD, correspondiente a un espesor de tan solo 3.5 mm en condiciones normales. Dada la baja concentración de ozono en la atmósfera, incluso en la zona de mayor concentración, sería más adecuado hablar de pantalla de ozono en lugar de capa de ozono (23).

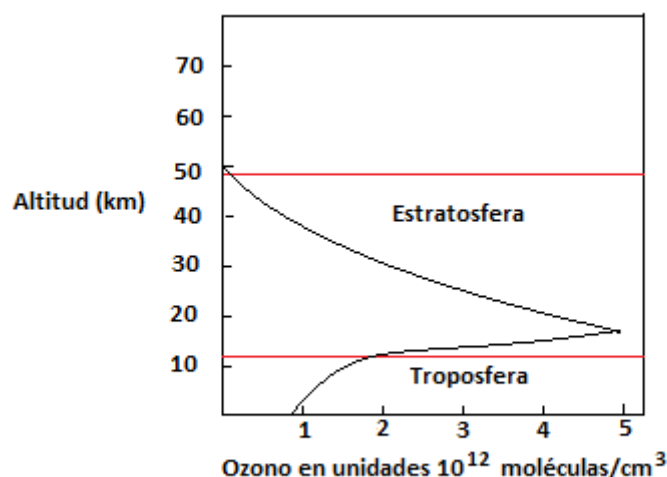


Figura 12: Distribución de ozono en la atmósfera

Mecanismo de destrucción de la capa de ozono

El ozono, de fórmula O_3 , es un gas que absorbe gran parte de las radiaciones solares de más alta energía, siendo estas muy perjudiciales para la vida en la tierra. 'Absorber' es solo una forma de hablar. Se dice aquí en el sentido de que la radiación solar rompe el ozono haciéndole perder energía y convirtiéndose así en una radiación inocua para la vida en la Tierra.

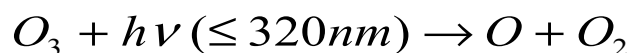
El ozono se genera en la estratosfera a partir de una primera reacción que consiste en la disociación de la molécula de oxígeno por acción de la radiación UV. La reacción que tiene lugar es la siguiente:

Una vez que se dispone de oxígeno atómico, este reacciona con otras moléculas de oxígeno circundantes, permitiendo la formación de ozono a través de un proceso exotérmico.



El calor liberado en este proceso hace que la temperatura de la estratosfera vaya aumentando. Pero según el gráfico, una capa de aire en esta zona estaría siempre más fría que la inmediatamente superior. Como es menos densa debería tender a subir rápidamente, pero la fuerza de la gravedad opera en sentido contrario, haciendo que los movimientos verticales de aire en esta capa sean muy lentos. Esto crea estratos de aire, y de ahí el nombre de estratosfera.

El ozono, a su vez, puede descomponerse siguiendo la reacción inversa, con una energía de disociación tan baja, que incluso la radiación infrarroja podría romperla. El problema es que esa absorción por parte del ozono se lleva a cabo de forma ineficiente, siendo muy pocas las moléculas que se disocian con estas longitudes de onda. No obstante, el espectro de absorción del ozono muestra que absorbe muy bien por debajo de 320 nm, lo que significa que, efectivamente, absorbe muy bien la radiación UV, tal y como vemos que se comporta en la atmósfera, como un filtro UV primario y absolutamente necesario para la vida en la Tierra.



Adicionalmente, el ozono se destruye también con los propios átomos de oxígeno para regenerar el oxígeno molecular siguiendo el proceso:

Según su longitud de onda, se distinguen varios subtipos de rayos ultravioleta (tabla 9):

Tabla 9. Rayos UV en función de su longitud de onda y energía

Nombre	Abreviación	»(nm)	Energía por fotón(eV)
Ultravioleta cercano	NUV	400-200	3,10-6,30
Onda Larga	UVA	400-320	3,10-3,87
Onda media	UVB	320-280	3,87-4,43
Onda corta	UVC	283-200	4,43-6,20
Ultravioleta lejano	FUV, VUV	200-10	6,20-124
Ultravioleta extremo	EUV, XUV	91,2-1	13,6-1240

Sin embargo, este último proceso es inherentemente lento, al ser la energía de activación bastante alta: $+18 \text{ kJ mol}^{-1}$, lo que significa que pocas colisiones tendrán la suficiente energía como para dar lugar a la reacción. Con todos estos procesos en marcha podemos decir que el ozono se forma, se destruye y se recompone constantemente. Así, la vida media de una molécula de ozono a 30 Km de altura es de media hora.

El desarrollo implica que el proceso comienza con la acción de los UV-C sobre las moléculas de oxígeno, dando oxígeno atómico. El ozono formado posteriormente filtra eficientemente los UV-B y UV-C, más perjudiciales, dejando pasar sólo los UV-A, que se controlan fácilmente con cremas solares. La razón por la que el ozono no se forma más abajo es porque la cantidad de rayos UV-C es baja, al estar filtrados en las capas superiores. Este proceso cíclico en el que se ve envuelto el ozono es el llamado ciclo de Chapman (figura 13).

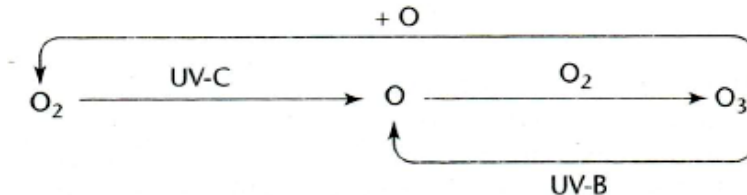
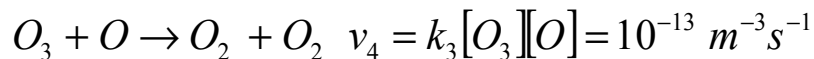
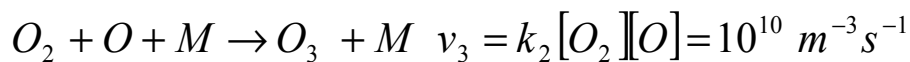
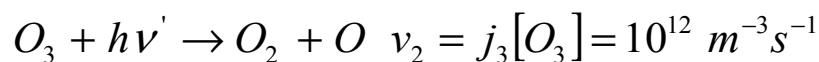
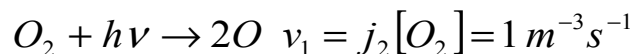


Figura 13. Ciclo de Chapman. Reacciones no catalítica de destrucción y producción de ozono (23).

No todas las reacciones del ciclo tienen la misma importancia relativa (valores para altura de 15km y temperatura de 273 K):



Para el cálculo de la capa de ozono, se utiliza la aproximación del estado estacionario, en donde se asume que la concentración de ozono se mantiene constante:

$$\frac{d[O_3]}{dt} = 0$$

Despreciando la reacción entre O y O₃ se tiene:

$$\frac{d[O_3]}{dt} = -j_3[O_3] + k_2[O][O_2][M] = 0$$

Se genera una capa de máxima concentración a una altura intermedia como se observa en la figura 12. En la practica la concentración de ozono observada es menor a la concentración predicha por el mecanismo de Chapman por lo que existen procesos de destrucción de ozono no tenidos en cuenta por este mecanismo (23).

Existen moléculas, tanto antropogénicas como de origen natural, que catalizan la destrucción de la capa de ozono:

- 1) Compuestos de hidrogeno: HOx
- 2) Compuestos de nitrógeno: NOx
- 3) Halógenos: Clx, Brx,

Por tratarse de procesos catalíticos, pequeñas cantidades de catalizador producen la destrucción de grandes cantidades de ozono.

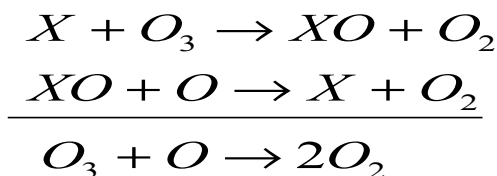
Las familias más importantes en la química estratosférica se muestran en la tabla 10:

Tabla 10. Familia de compuestos más importantes en la estratosfera

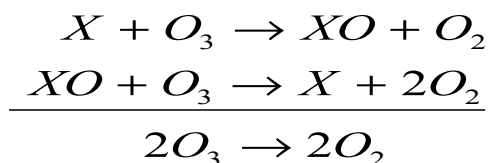
Símbol	Nombre	Componentes
O		
O_x	Oxígeno impar	O + O ₃
NO_x	Óxidos de nitrógeno	NO + NO ₂
NO_y	Nitrógeno oxidado	NO + NO ₂ + HNO ₃ + N ₂ O ₅ + ClONO ₂ + NO ₃ + HOONO ₂ + BrONO ₂
HO_x	Radicales hidrogeno	OH + HO ₂
Cl_y	Cloro inorgánico	Cl + Cl ₂ + ClO + OClO + Cl ₂ O ₂ + HOCl + ClONO ₂ + HCl + BrCl
ClO_x	Cloro reactivo	Cl + ClO
CCl_y	Cloro orgánico	CF ₂ Cl ₂ + CFCl ₃ + CCl ₄ + CH ₃ CCl ₃ + CFCl ₂ CF ₂ Cl (CFC113) + CF ₂ HCl (CFC22)
Br_y	Bromo inorgánico	Br + BrO + HOBr + BrONO ₂

Los mecanismos generales de la destrucción de ozono en la estratosfera están dados por:

- ❖ Estratosfera superior (30-50km, más concentración de O):



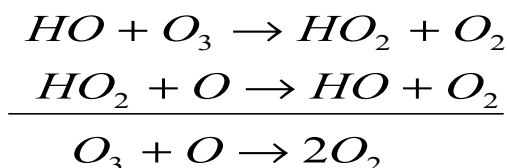
- ❖ Estratosfera inferior (18-25km, menos concentración de O)



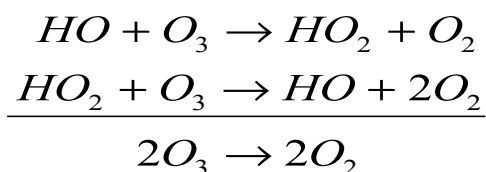
También existen mecanismos mixtos que involucran varias especies:

I. HO y HO₂ catalizan la destrucción de O₃

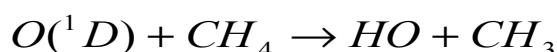
- ❖ Estratosfera superior:



❖ Estratósfera inferior:

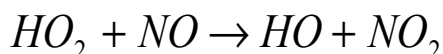


La familia HO_x ($OH + HO_2$) desempeña un papel clave en la química estratosférica. De hecho, el primer ciclo catalítico identificado que destruye el ozono involucra radicales que contienen hidrógeno (24). Producción de OH en la estratosfera se inicia por fotólisis de O_3 para producir $O(^1D)$ (solo el oxígeno singlete puede producir HO), seguido de:

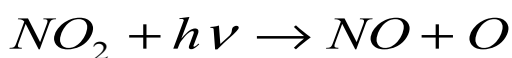


Mientras que la troposfera contiene abundante vapor de agua, H_2O poco llega a la estratosfera; las bajas temperaturas conducen a una congelación efectiva del agua antes de que pueda ser transportado hacia arriba (una "trampa de frío"). Relaciones de mezcla de H_2O en la estratosfera no excedan aproximadamente 5-6 ppm. De hecho, aproximadamente la mitad de este vapor de agua en la estratosfera en realidad es el resultado de la oxidación del metano que se ha filtrado en la estratosfera desde la troposfera. Entre las alturas 20 y 50 km la tasa total de la producción de OH de las dos reacciones anteriormente es aproximadamente de 2×10^4 moléculas $cm^{-3} s^{-1}$. Alrededor del 90% es el resultado de la reacción $O(^1D) + H_2O$ y el restante 10% resulta de $O(^1D) + CH_4$.

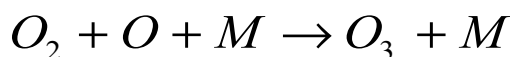
OH y HO_2 rápidamente se interconvierten a fin de establecer la familia química HO_x . Una reacción importante que afecta a la interconversión entre OH y HO_2 en el ciclo HO_x es:



El NO_2 formado en esta reacción fotoliza:



Seguido de:



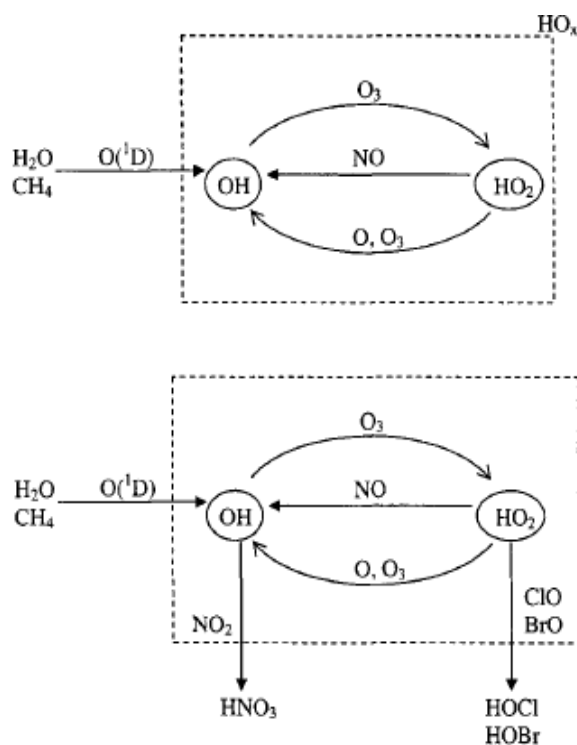
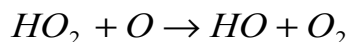


Figura 13. Familia HO_x estratosférica. El panel superior muestra solamente la dinámica interna del sistema HO_x. El panel inferior incluye reacciones adicionales que afectan los niveles de HO y HO₂ (23).

Como resultado, si una molécula de HO₂ reacciona con NO antes de que tenga la oportunidad de reaccionar con O o O₃, el resultado es un ciclo nulo con respecto a la eliminación de O₃. Cada vez que una molécula de HO₂ sigue el camino inferior y reacciona con O o O₃, dos moléculas de oxígeno se eliminan (Figura 13):



La regeneración del HO₂ ocurre mediante:

II. NO y NO₂ catalizan la destrucción de O₃

El mecanismo principal es:

El nitrógeno reactivo se produce en la estratosfera a partir de N₂O. El N₂O es producido por procesos microbianos en los suelos y el océano y no sufre reacciones en la troposfera.

El resto reacciona con O(1D):

La reacción 2a es la principal fuente de NO_x en la estratosfera. Alrededor del 58% de los que procede la reacción N₂O + O(1D) es a través del canal 2a y el 42% restante por el canal 2b. La afluencia principal de las especies de la troposfera a la estratosfera se produce en los trópicos, y el N₂O entra a través de esta ruta. El N₂O advecta lentamente hacia arriba. Durante su ascenso, N₂O se diluye y al mismo tiempo, desaparece por reacciones 1 y 2. Cuanto más alto una molécula de N₂O se eleva en la estratosfera, se encuentra con fotones más energéticos y más rápida es su fotodisociación por la reacción 1. En la figura 14 se muestra el ciclo 1 de la familia NO_x

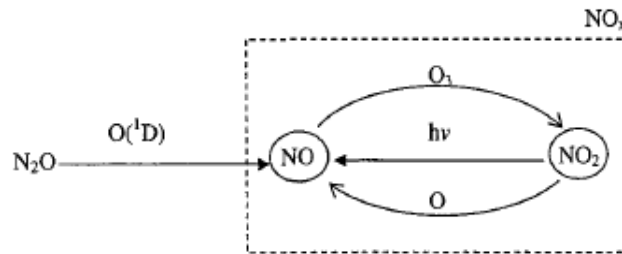
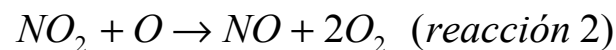
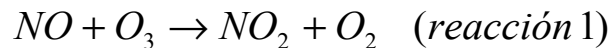
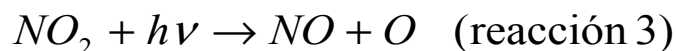


Figura 14. Familia NO_x estratosférica. Ciclo 1 (23)

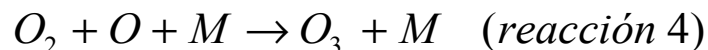
Ciclo 1:



Compitiendo con la reacción 2 se encuentra la fotólisis de NO₂



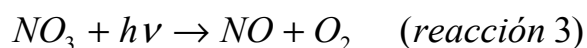
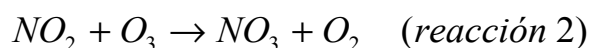
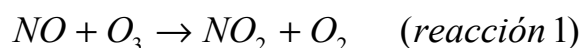
Seguida por la reacción 4



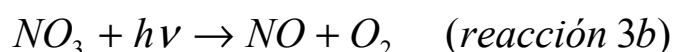
Si la reacción 1 es seguida por la reacción 3, entonces no hay destrucción neta O₃ debido a que el átomo de O formado en la reacción 3 combina rápidamente con O₂ para reformar O₃ en la reacción 4. Si, por el contrario, la reacción 2 es seguida por la reacción 1, a continuación, dos moléculas de oxígeno impar se convierten en dos moléculas de O₂.

El ciclo 1 es más eficaz en la estratosfera superior, donde las concentraciones de átomos de O son más altas. Un ciclo de NO_x que no requiere átomos de oxígeno y por lo tanto es más importante en la estratosfera inferior es el ciclo 2:

Ciclo 2:



El radical nitrato (NO_3) formado en la reacción 2, durante el día reacciona por fotólisis rápidamente (a una velocidad de alrededor de $0,3 \text{ s}^{-1}$), mediante dos vías para la fotólisis:



La velocidad de fotólisis por la reacción 3a es aproximadamente 8 veces mayor que para la reacción 3b, conduciendo esta última a una pérdida total de oxígeno impar y es la reacción implicada en el ciclo 2. Por la noche, NO_3 formado por la reacción 2 no se foto disocia y participa en una serie importante de reacciones que involucran partículas de aerosol estratosféricas.

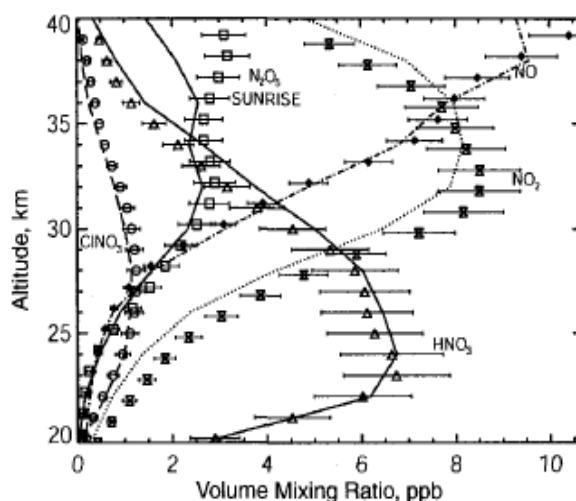


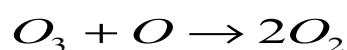
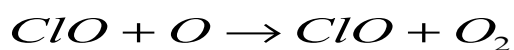
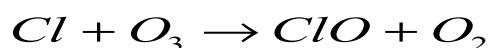
Figura 15. Proporciones de mezcla de NO , NO_2 , HNO_3 , N_2O_5 , y $ClONO_2$ en función de la altura (23)

La figura 15 muestra las proporciones de mezcla de NO , NO_2 , HNO_3 , N_2O_5 , y $ClONO_2$ medido a $35^\circ N$. A los 25 km, la especie predominante es NO y HNO_3 , mientras que desde 30 de 35 km, el NO_2 es el compuesto principal. Por encima de 35 km, el NO es predominante.

III. Compuestos halogenados también catalizan la destrucción de O_3

Ciclos de cloro

El mecanismo principal es (Ciclo 1):



El átomo de cloro es muy reactivo hacia O₃ y establece un ciclo rápido de destrucción O₃ que implica el monóxido de cloro (ClO) radical. El Cl y el ClO forman la familia ClO_x (figura 16).

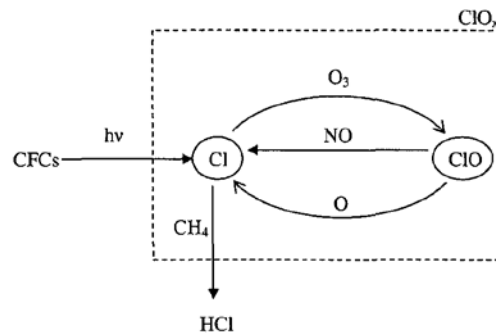


Figura 16. Familia ClO_x en la estratosfera (23)

El ciclo interno se caracteriza por la rápida formación de dióxido de cloro por reacción entre Cl y O₃ y la pérdida por reacción con ambos O y NO. Si ClO reacciona con O, el ciclo de agotamiento catalítico de O₃ se produce. Si ClO reacciona con el NO, el siguiente ciclo se lleva a cabo (**ciclo 2**):

Debido a que el átomo de oxígeno se transforma rápidamente en O₃, es un ciclo nulo respecto a la destrucción de O₃.

La figura 16 muestra una vista ampliada de la química del cloro estratosférico. En altitudes más bajas, la especie reservorio del ClO es el ClONO₂. A medida que aumenta la altitud, [M], y disminuye la velocidad de la reacción ClO + NO₂ + M + M' → ClONO₂, disminuye. La formación de la especie reservorio HCl y ClONO₂ producen un máximo de [ClO] a unos 40 km. Un aumento de OH produce efectos opuestos sobre los ciclos de NO_x y ClO_x. A medida que aumenta OH, HCl se convierte de nuevo en Cl activo, mejorando la eficacia del ciclo de ClO_x en la destrucción de O₃. Por otro lado, a medida que aumenta OH, más NO₂ se convierte en reservorio de HNO₃, disminuyendo la eficacia catalítica del ciclo de NO_x.

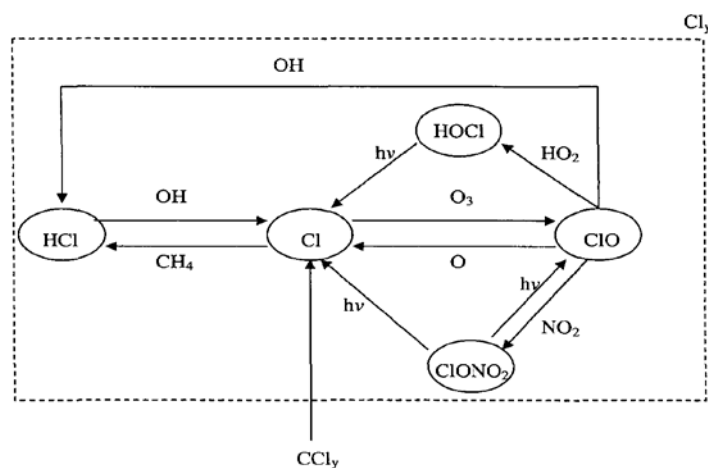


Figura 17. Familia Cl y ClO_x en la estratosfera (23)

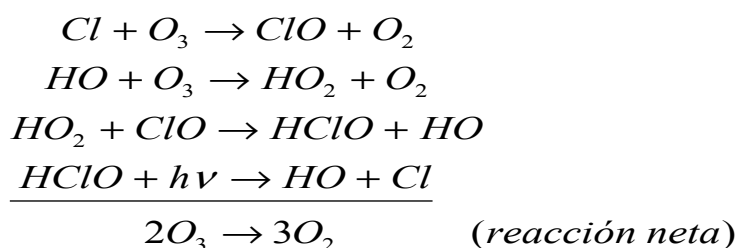
De la figura 17 podemos definir la familia química de cloro reactivo como:



Los CCLy, el cloro contenido en CFC, CH_3Cl , CCl_4 , etc, disminuyen con la altitud, como resultado de foto-disociación de los CFC, por lo que la especie Cly aparece, de manera que se conserva el balance de masa del cloro. Juntos, HCl y ClONO_2 representan el 99% del cloro activo. Como resultado, sólo un pequeño cambio en la abundancia de HCl o ClONO_2 puede tener un profundo efecto en la eficiencia catalítica del ciclo ClO_x .

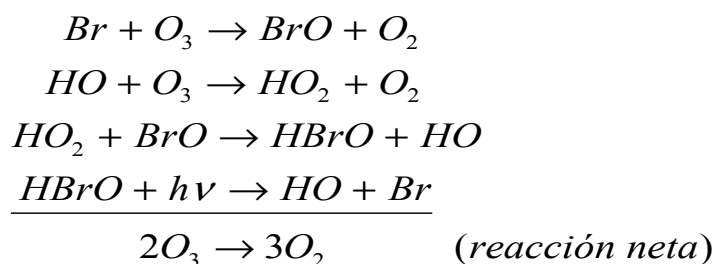
En altitudes más bajas, donde los niveles de átomos de O son significativamente más bajos, el siguiente ciclo que implica el acoplamiento con HO_x es importante:

Ciclo HO_x/ClO_x :

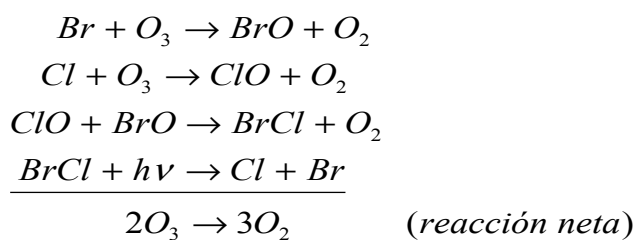


Además, los ciclos HO_x/BrO_x y $\text{ClO}_x/\text{BrO}_x$ son importantes en la estratosfera inferior (~ 20 km):

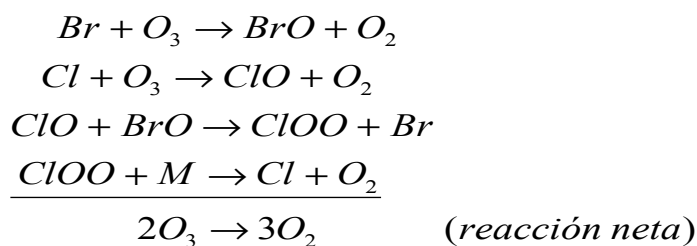
Ciclo HO_x/BrO_x



Ciclo 1 $\text{ClO}_x/\text{BrO}_x$



Ciclo 2 $\text{ClO}_x/\text{BrO}_x$



Ciclos de bromo

Si bien la proporción de mezcla en la estratosfera de la familia de cloro es de aproximadamente 3400 ppt, para los gases de bromo es de aproximadamente 20 ppt.

Sorprendentemente, con 150 veces menor abundancia que el cloro, el bromo es aproximadamente tan importante como el cloro en la destrucción total de ozono. El bromuro de metilo (CH_3Br) constituye aproximadamente la mitad de la fuente de bromo en la estratosfera. Los compuestos que contienen de bromo con átomos de H, CH_3Br , CH_2Br_2 , y CHBr , liberan Br casi de inmediato al entrar en la estratosfera; los compuestos CBrFCl_2 y CBrF_3 , liberan Br más lentamente y por lo tanto a mayor altitud. La familia Br_y se muestra en la Figura 18. Con el fin de entender por qué los compuestos de bromo son mucho más eficaces en la destrucción del ozono, debemos tener en cuenta el papel de las especies de reserva en ciclos de destrucción del ozono estratosférico.

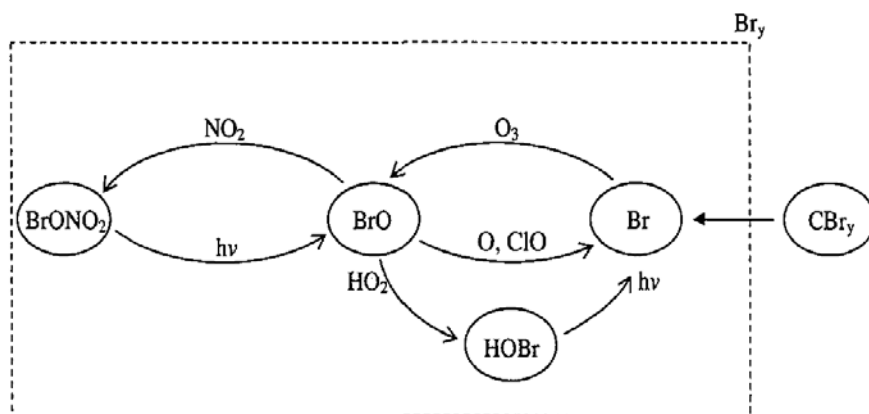


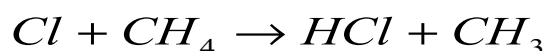
Figura 18. Familia Br_y en la estratosfera (23).

ESPECIES RESERVORIO Y CICLOS ACOPLADOS

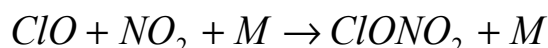
Ciclos tales como los ciclos 1 y 2 de HO_x , ciclo 1 de NO_x , y ciclo 1 ClO_x parecieran que destruirán el O_3 por siempre. En realidad, el ciclo se puede interrumpir cuando las especies reactivas, OH, NO_2 , Cl, y ClO, se convierten en especies relativamente estables de modo que no están disponibles para actuar como catalizadores en los ciclos. Al conocer las reacciones que compiten, es posible estimar el número medio de veces que cada ciclo de destrucción catalítica O_3 procederá antes de que uno de los reactivos participe en una reacción competitiva y termina el ciclo.

Por ejemplo, a concentraciones estratosféricas actuales, el ciclo 1 ClO_x una vez iniciado, tiene en promedio 105 bucles antes de que el átomo de Cl o la molécula de ClO reacciona con algunas otras especies terminando el ciclo. Esto significa que, en promedio, un átomo de cloro puede destruir 100.000 moléculas de ozono antes de que se elimine de otro modo. La frecuencia de estas reacciones de terminación de ciclo es por lo tanto crucial para la eficacia global de un ciclo. La eliminación de una especie reactiva puede ser permanente si el producto realmente sale de la estratosfera para finalmente migrar a la troposfera, donde se elimina de la atmósfera por completo.

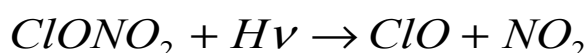
Ejemplos de reacciones de ciclo de interrupción de que pueden conducir a la eliminación final de la atmósfera son:



Tanto el ácido nítrico (HNO_3) y cloruro de hidrógeno (HCl) son relativamente estables en la estratosfera y alguna fracción de cada uno migra y se retira de la troposfera por precipitación. Una especie reactiva también se puede eliminar temporalmente de un ciclo catalítico y se almacenarán en una especie de depósito (especie reservorio), que en sí es relativamente no reactivo, pero en realidad no es removido de la atmósfera. Una de las especies de reserva más importantes en la estratosfera es nitrato de cloro ($ClONO_2$), formado por:



El nitrato de cloro puede reaccionar mediante fotólisis:



Liberando de este modo Cl o ClO . Nitrato de cloro es un especialmente importante reservorio de especies, ya que almacena dos agentes catalíticos, NO_2 y ClO . La partición de cloro entre especies (por ejemplo, Cl y ClO) y especies reservorio (por ejemplo, HCl y $ClONO_2$) depende de la temperatura, la altitud, la latitud y la historia de una parcela de aire.

Para la latitud media, baja estratosfera, HCl y $ClONO_2$ son las especies reservorio dominante para el cloro, que constituye más del 90% del cloro inorgánico total.

Los ciclos HO_x , NO_x , y ClO_x están todos acoplados entre sí, y sus interrelaciones gobiernan fuertemente la química del ozono estratosférico. Los ciclos de NO_x y ClO_x están acoplados por $ClONO_2$. Por ejemplo, el aumento de las emisiones de N_2O conduciría a un aumento de las concentraciones estratosféricas de NO y, por tanto, el aumento de la destrucción del ozono por el ciclo catalítico NO_x . Del mismo modo, el aumento de los niveles de CFC conducirá a una mayor reducción del ozono por el ciclo ClO_x . Sin embargo, el aumento de NO_x dará lugar a un aumento del nivel del depósito $ClONO_2$ y la mitigación del ciclo cloro. Así, el efecto neto sobre el ozono de los aumentos simultáneos en ambos N_2O y CFC es menor que la suma de sus efectos por separado debido a una mayor formación de $ClONO_2$. El aumento de los niveles de CH_4 o H_2O estratosférico también actúa para mitigar la eficiencia de los ciclos de NO_x y ClO_x a través de una mayor formación de HCl y OH (y por lo tanto HNO_3).

Mientras que HCl es formado por a partir de $Cl + CH_4$, la reacción correspondiente de átomos de Br con el CH_4 es endotérmica y extremadamente lenta. Como consecuencia, las únicas vías posibles para la formación de HBr involucran la reacción de Br con especies mucho menos abundantes que el CH_4 , tales como HO_2 . Incluso si se forma HBr , el coeficiente velocidad de $OH + HBr$ es de aproximadamente 12 veces más grande que el de $HCl + OH$, de modo que el tiempo de vida de la estratosfera de HBr contra la reacción OH es una cuestión de días, en comparación con alrededor de 1 mes del HCl . Además, $BrONO_2$ es considerablemente menos estable que $ClONO_2$ debido a la rápida fotólisis. En comparación, los tiempos de vida

de fotólisis de ClONO_2 y BrONO_2 en la estratosfera inferior son 6 horas y 10 minutos, respectivamente.

En resumen, la extraordinaria eficacia del sistema catalítico Br es una consecuencia de dos factores: (1) Los compuestos Br liberan su Br rápidamente en la estratosfera. (2) Una gran fracción del total del sistema Bry existe en forma de Br + BrO. Como resultado, el potencial de destrucción del ozono por el Br es aproximadamente 50 veces mayor que las del sistema de Cl.

AGUJERO DE OZONO

En 1985, un equipo dirigido por el científico británico Joseph Farman sorprendió a la comunidad científica con los informes de disminuciones anuales masivas de ozono estratosférico sobre la Antártida en la primavera polar (septiembre-octubre), una observación que la comprensión predominante de la química del cloro estratosférico era incapaz de explicar (25). Este fenómeno se ha denominado el "agujero de ozono" por la prensa popular. El British Antarctic Survey ha, durante muchos años, estado midiendo los niveles de ozono total en columna desde el nivel del suelo en su base en Halley Bay. Los datos parecen indicar que los niveles de ozono en la columna habían ido disminuyendo desde alrededor de 1977. Cuando el trabajo de Farman apareció, existía la preocupación de que los instrumentos a bordo del satélite Nimbus 7, el espectrómetro cartográfico del ozono total (TOMS) y el instrumento solar ultravioleta retrodispersada (SBUV), aparentemente no habían detectado el agotamiento del ozono vistos en los datos con base en tierra. Resultó que, tras la inspección de los datos de satélite, que las bajas concentraciones de ozono se observan en efecto, pero estaban siendo rechazadas sistemáticamente en la base de datos por estar fuera del rango razonable de los datos. Una vez que esto fue descubierto, los datos de los satélites confirmaron las mediciones en tierra de la British Antarctic Survey.

El descubrimiento del agujero de ozono fue sorprendente no sólo por su magnitud sino también su ubicación. Se esperaba que el agotamiento del ozono resultante del ciclo catalítico ClO_x se manifestara principalmente en las latitudes medias y bajas ya una altura de entre 35 y 45 km. En la figura 19 se muestra la evolución del agujero de ozono desde 1979.

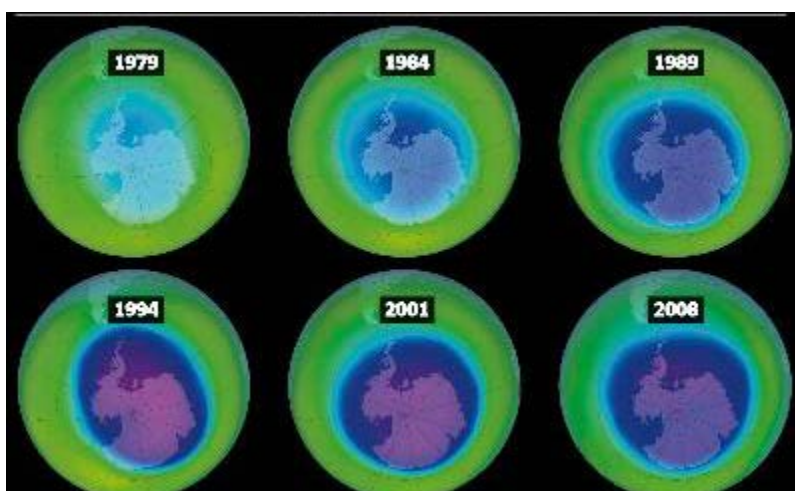
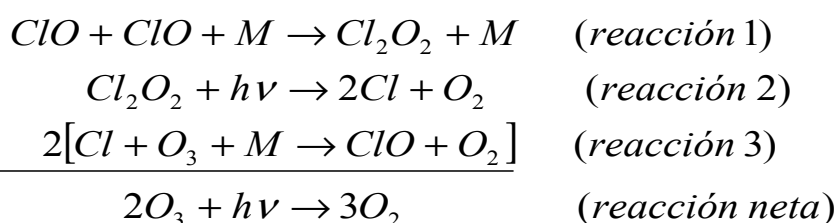


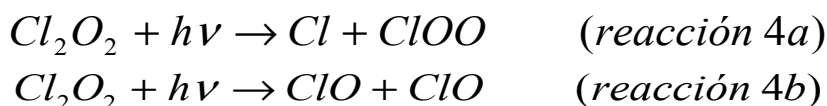
Figura 19. Evolución del agujero de ozono.

Inicialmente se sugirió que el agujero de ozono antártico podría explicarse sobre la base de los ciclos solares o la dinámica puramente atmosféricas. Ninguna de estas explicaciones fue consistente con las características observadas del agujero de ozono. Se avanzaron explicaciones químicas a base de los ciclos catalíticos de fase gas descritos anteriormente. Como se ha señalado, se produce poco ozono en la estratosfera polar, resultando esencialmente en la no fotodisociación de O₂. Por lo tanto los ciclos catalíticos que requieren átomos de oxígeno no fueron capaces de explicar el agotamiento masivo de ozono.

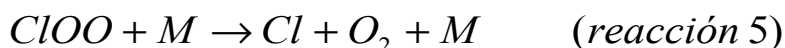
Por otra parte, los CFC y halógenos serían más eficaces en la disminución del ozono en la estratosfera de la Antártida a una altitud de unos 40 km, mientras que el agujero de ozono está claramente definido entre 12 y 24 km de altitud. Además, los niveles actuales de los CFC y los halógenos podrían conducir a lo sumo a un agotamiento de O₃ a 40 km de orden del 5-10%, muy por debajo de lo observado. Molina y Molina (26) propusieron que un mecanismo que implica el dímero ClO, Cl₂O₂:



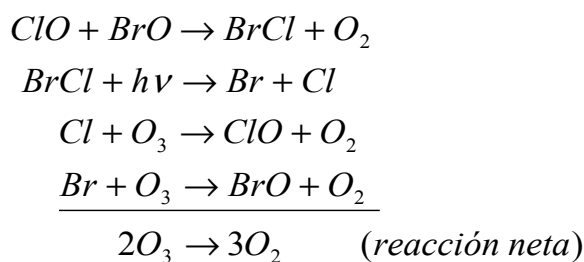
La reacción bimolecular de ClO + ClO es lenta y puede despreciarse. La reacción 1 se facilita a presiones más altas, es decir, M más grande, y baja temperatura. La fotólisis del ClOOCI tiene dos canales posibles:

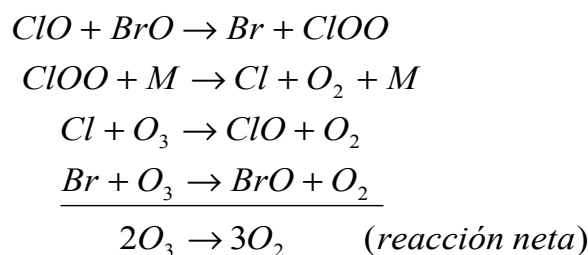


Únicamente la reacción 4a puede conducir a un ciclo que destruye el ozono. De hecho, la reacción 4a es la ruta principal de la fotólisis. El producto ClOO se descompone rápidamente para dar un átomo de Cl y O₂,



La reacción 2 se ve que es una combinación de reacciones 4a y 5, que conduce a la liberación de ambos átomos de cloro del Cl₂O₂. Dos ciclos similares que involucran ClO_x y BrO_x pueden tener lugar:





Téngase en cuenta que el oxígeno atómico no es necesario en ningún ciclo. Si se podrían generar suficientes concentraciones de ClO y BrO, los tres ciclos señalados anteriormente podrían llevar a un agotamiento sustancial O_3 .

Sin embargo, la química en fase gaseosa sola no produce las concentraciones de ClO y BrO necesarios para sostener estos ciclos.

Nubes polares estratosféricas

La estratosfera es muy seca y por lo general sin nubes. La noche polar es larga, sin embargo, produce temperaturas tan bajas como 183K (-90 °C) a una altura de 15 a 20 km. A estas temperaturas incluso una pequeña cantidad de vapor de agua se condensa para formar nubes estratosféricas polares (PSC), vistas como nubes color rosa tenue o verdes en el cielo crepuscular sobre las regiones polares de. El avance conceptual para explicar el agujero de ozono antártico se produjo cuando se dieron cuenta de que las PSC proporcionan superficies sobre las que se convierten especies reservorios que contienen halógenos (especies catalíticas activas). En las PSC se detectaron nitrato de cloro y estudios teóricos demostraron que el trihidrato de ácido nítrico, $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, denota NAT, es la forma termodinámicamente estable de HNO_3 en hielo a la temperatura de la estratosfera polar. También se descubrió que algunas PSC están compuestas por partículas líquidas de soluciones ternarias subfundidas de H_2SO_4 , HNO_3 , y H_2O (23).

Una implicación importante del hecho de que las PSC contengan nitrato es que, si las partículas son suficientemente grandes, pueden caer fuera de la estratosfera y de este modo permanentemente eliminar el nitrógeno de la estratosfera. La eliminación de nitrógeno de la estratosfera se denomina desnitrificación y si el nitrato de las PSC sedimenta fuera de la estratosfera, a continuación, que podría dar lugar a un suministro apreciablemente inferior de nitrato para la posible generación de NO_x (y la conversión del ClO a ClONO_2).

El mecanismo de destrucción del ozono en la estratosfera polar es el siguiente. Son necesarios dos ingredientes: las bajas temperaturas y la luz solar. Se necesitan temperaturas frías para formar nubes estratosféricas polares (PSC) para proporcionar las superficies en las que las reacciones heterogéneas tienen lugar. Las especies de reserva ClONO_2 y N_2O_5 reaccionan de forma heterogénea con PSC en el que HCl que contiene absorbido para producir Cl_2 , HOCl, y ClNO_2 en estado gaseoso. Entonces se requiere la luz solar para la fotólisis de Cl_2 , HOCl, y ClNO_2 que se producen como resultado de las reacciones heterogéneas. Al salir el sol, el Cl_2 , ClNO_2 , y HOCl se fotolizados, liberando átomos de Cl libre que luego reaccionan con O_3 .

La figura 20 representa los ciclos catalíticos y del papel de los PSC. Al principio, el ClO solo se acumula (recordemos que los átomos de O normalmente necesario para completar el ciclo de $\text{ClO} + \text{O}$ están esencialmente ausentes en la estratosfera polar). Sin embargo, una vez que

las concentraciones de ClO son suficientemente grandes, se producen los tres ciclos catalíticos presentados anteriormente. El ciclo ClO-ClO representa aproximadamente el 60% de la pérdida de ozono en la Antártida, y los ciclos de ClO-BrO representan el 40% restante (23).

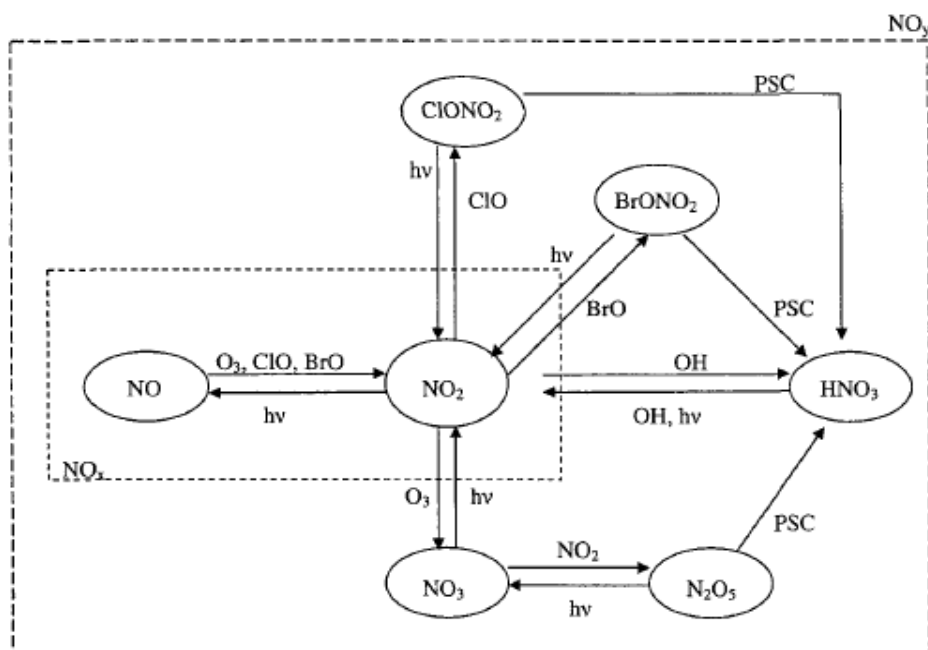


Figura 20. Ciclos catalíticos involucrados en la destrucción del O₃ polar (23).

QUÍMICA DE LA TROPOSFERA

La troposfera se comporta como un depósito de productos químicos relativamente distinta de la estratosfera. Transporte de especies de la troposfera a la estratosfera es mucho más lento que la mezcla dentro de la propia troposfera. Un gran número de especies son emitidas en la superficie de la Tierra, y los que poseen tiempos de vida media menores de un año se destruyen en la troposfera. A pesar de que la radiación solar de longitudes de onda más energéticas se elimina en la estratosfera, la luz de longitudes de onda con suficiente energía penetra en la troposfera de promover reacciones fotoquímicas significativas. Un factor importante en la química de la troposfera es la relativamente alta concentración de vapor de agua. La química de la estratosfera implica las reacciones en que se forma y destruye el ozono.

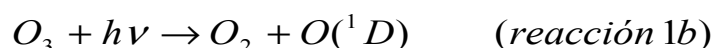
El ozono en la troposfera se genera a partir de dos clases principales de los precursores: los compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_x, lo que denota la suma de NO y NO₂). El proceso de formación de ozono se inicia por la reacción del radical OH con moléculas orgánicas. La secuencia de reacción posterior es catalizada por NO_x, en una red entretejida de reacciones de radicales libres. La mayor parte de la emisión directa de NO_x a la atmósfera es en forma de NO. El NO₂ se forma en la atmósfera por la conversión de NO. Al igual que en la estratosfera, los dos óxidos de nitrógeno se agrupan generalmente en conjunto como NO_x debido a que la interconversión entre el NO y NO₂ es rápida (con una escala de tiempo de la troposfera de ~ 5 min) en comparación con la escala de tiempo para la oxidación orgánica (de una a varias horas). Las proporciones de mezcla de NO * van de 5 a 20 ppb en

zonas urbanas, alrededor de 1 ppb en zonas rurales, y de 10 a 100 partes por mil en la troposfera remota.

En la troposfera remota, la formación de ozono es sostenida por la oxidación de monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄), cada uno a través de la reacción con OH. El CO y CH₄ son especies de vida larga, con una vida atmosférica contra la reacción de OH de aproximadamente 2 meses y 9 años, respectivamente. La formación de ozono en la atmósfera urbana y regional es impulsada por compuestos orgánicos volátiles tanto de vida más corta emitidos por fuentes antropogénicas y biogénicas. Estos incluyen alquenos, aromáticos, y especies orgánicas oxigenadas. Debido a que dos clases de compuestos precursores están involucrados en la formación de ozono troposférico, compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno, una cuestión clave es cómo el cambio de los niveles de COV y NO_x afecta la cantidad de ozono formado. Veremos que la formación de ozono depende críticamente del nivel de NO_x.

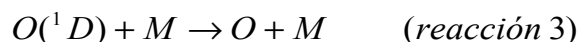
PRODUCCIÓN DE RADICALES HO EN LA TROPOSFERA

La clave para entender la química de la troposfera comienza con el radical hidroxilo (OH). Debido a que el radical OH no es reactivo hacia O₂, una vez producido, sobrevive hasta reaccionar con prácticamente todas las especies traza atmosféricas. Los oxidantes más abundantes en la atmósfera son O₂ y O₃, pero estas moléculas tienen grandes energías de enlace y son generalmente no reactivos, excepto con ciertos radicales libres; esto deja al radical OH como la especie oxidante primaria en la troposfera. La fotólisis del O₃ (en longitudes de onda <319 nm) para producir tantos átomos de oxígeno en estado fundamental (O) y singlete excitado (O(¹D)) átomos de oxígeno es importante tanto en la estratosfera como la troposfera:



El oxígeno en estado fundamental reacciona rápidamente con O₂ para dar O₃

La reacción 2 no tiene efecto químico neto. Sin embargo, cuando se produce O(¹D), ya que está prohibida la transición espontánea de O(¹D) a O, debe reaccionar con otra especie atmosférica. Lo más a menudo es que O(¹D) colisione con N₂ o O₂, eliminando su exceso de energía y volviendo a su estado fundamental:



Dado que el O a continuación, sólo reacciona con O₂ por reacción 2 para reponer O₃, este camino, que consiste en reacciones 1b, 3 y 2, es simplemente otro ciclo nulo. Ocasionalmente, sin embargo, el O(¹D) colisiona con una molécula de agua y produce dos radicales OH:

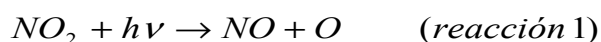


La reacción 4 es, de hecho, la única reacción en fase gas en la troposfera capaz de romper el enlace H-O en H₂O.

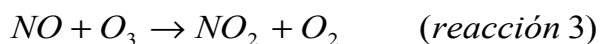
El radical hidroxilo no reacciona con ninguno de los principales constituyentes de la atmósfera, tales como N₂, O₂, CO₂ o H₂O, sin embargo, es la especie reactiva más importantes en la troposfera. De hecho, OH reacciona con la mayoría de las especies traza en la atmósfera, y su importancia se deriva tanto de su alta reactividad hacia otras moléculas y de su concentración relativamente alta. Donde OH simplemente reacciona con otras especies y no fuera regenerado, su concentración sería demasiado baja, a pesar de su alta reactividad, para ser un jugador importante en la química de la troposfera. La clave es que, al reaccionar con los gases traza atmosféricos, OH se genera en los ciclos catalíticos, lo que lleva a las concentraciones sostenidas en el orden de 10⁶ moléculas cm⁻³ durante las horas del día (23).

➤ **Ciclo básico fotoquímico del NO₂, NO y O₃**

Cuando NO y NO₂ están presentes junto a radiación solar se forma ozono como resultado de la fotólisis de NO₂ en longitudes de onda <424 nm:

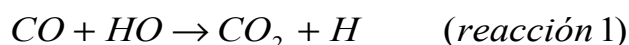


No hay fuentes significativas de ozono en la atmósfera distinta de la reacción 2. Una vez formada, O₃ reacciona con el NO para regenerar NO₂:

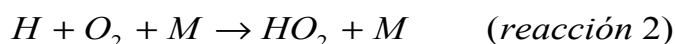


➤ **Química atmosférica del CO**

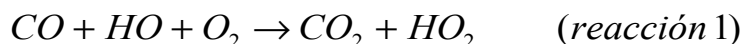
La oxidación atmosférica de CO exhibe muchas de las características clave de las de moléculas orgánicas mucho más complejas, y por eso es el lugar ideal para comenzar un estudio de la química de la troposfera. El CO reacciona con el radical HO



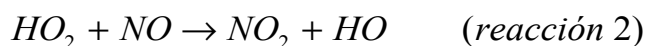
Y el H formado en la reacción 1 reacciona rápidamente con O₂ para dar el radical hidroperoxilo



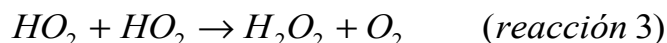
Pudiendo simplificar la reacción 1 de la siguiente forma



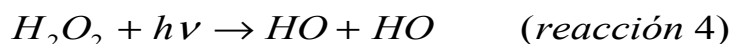
La adición de un átomo de H al O₂ debilita el enlace O-O en el O₂, y los radicales HO₂ resultantes reaccionan mucho más fácilmente que el O₂ mismo. Cuando no está presente, la reacción atmosférica más importante que los sufre radicales HO₂ es con NO:

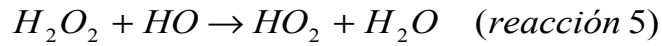


El hidroperoxilo radical también reacciona consigo mismo para producir peróxido de hidrógeno (H₂O₂):

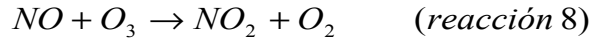
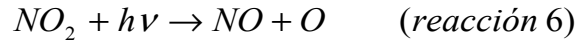


El peróxido de hidrógeno es un depósito temporal para HO_x (OH + HO₂):





La reacción 4 devuelve dos especies HO_x , mientras que en la reacción 5 una y se pierde una H_2O . El NO_2 formado en la reacción 2 participa en el ciclo fotoquímico NO_x ($NO + NO_2$):



Por último, la terminación de la cadena se produce cuando OH y NO_2 reaccionan para formar ácido nítrico:

La oxidación de CO se representa en términos de la familia HO_x en la Figura 21. P_{HO_x} indica la velocidad de generación de OH desde la fotólisis del O_3 . Para simplificar, no mostramos un flujo de H_2O_2 de nuevo en HO_x . Dentro de la familia HO_x , las especies OH y HO_2 rápidamente ciclan entre sí, de modo que se establece un estado estacionario de la relación OH/HO_2 , que depende del nivel de NO_x . La Figura 21 muestra la oxidación de CO desde la perspectiva de la familia química de NO_x . Las flechas gruesas de interconexión NO y NO_2 indican que este ciclo se produce con más frecuencia.

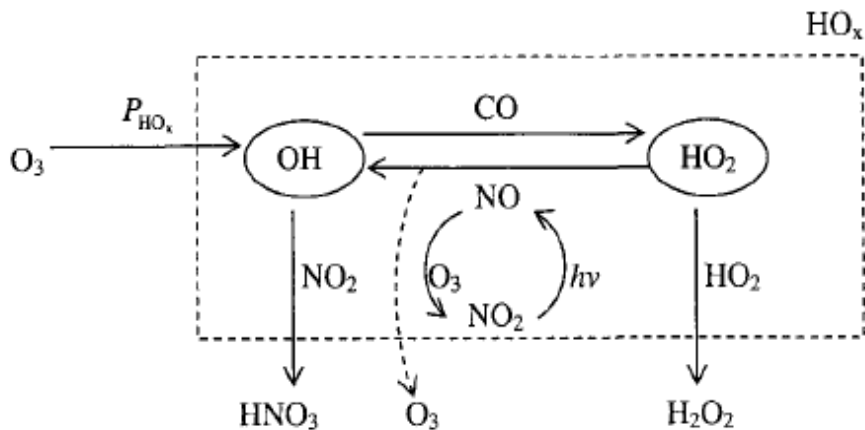


Figura 21. Reacciones que involucran la familia HO_x en la oxidación de CO (23)

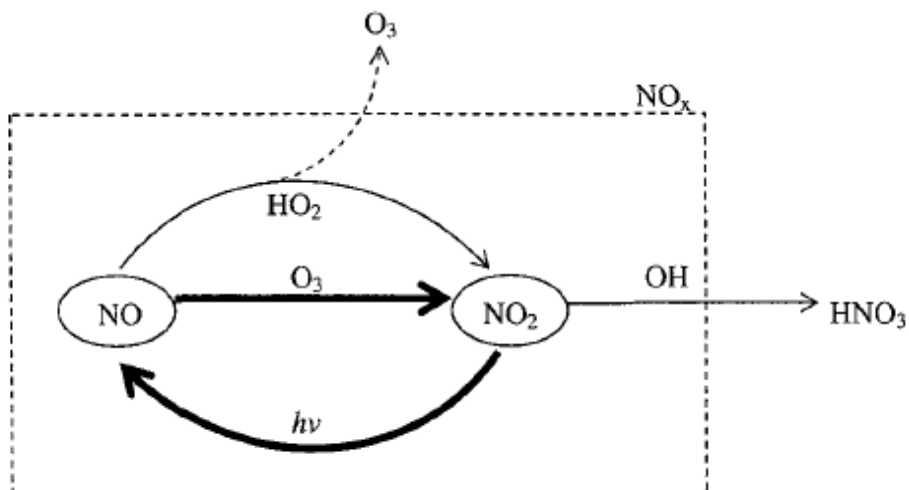


Figura 22. Reacciones que involucran la familia NO_x en la oxidación de CO (23).

Cada vez que se producen una reacción $\text{HO}_2 + \text{NO}$, una molécula de O_3 adicional se produce como resultado de la fotólisis de la molécula de NO_2 . En las Figura 21 y 22, esto se indica por las líneas discontinuas que conducen a O_3 . Se trata de una "nueva" molécula de O_3 porque la molécula de NO_2 formado a partir de $\text{HO}_2 + \text{NO}$, no requería una molécula de O en su formación.

➤ **Eficiencia de producción del ozono**

Una medida importante de los ciclos de oxidación que forman ozono atmosférico es la eficiencia de la producción de ozono (OPE). Debido al NO_x se cicla hacia atrás y adelante entre el NO y NO_2 en la generación de O_3 . El NO_x puede ser visto como el catalizador en la formación de O_3 . Uno puede definir el OPE como el número de moléculas de O_3 formados por cada NO_x eliminado del sistema (Figura 23).

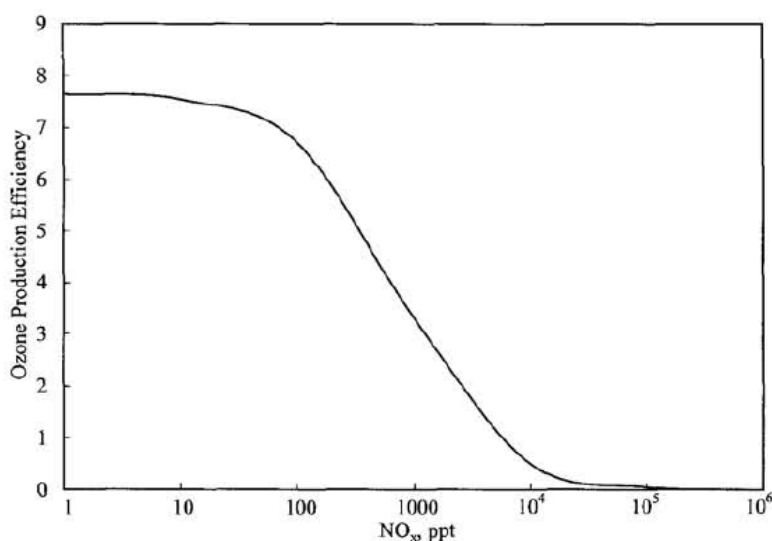
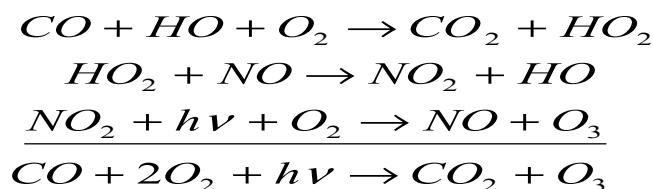


Figura 23. Eficiencia de producción de ozono para la oxidación atmosférica de CO en función de los niveles de NO_x a 298k en la superficie terrestre, $P_{\text{OHx}} = 1 \text{ ppt s}^{-1}$, $[\text{NO}]/[\text{NO}_2]=0,1$ y razón de mezcla CO de 200 ppb (23)

➤ **Rendimiento teórico máximo de ozono a partir de la oxidación CO**

El rendimiento máximo teórico de la reacción de formación de O_3 por $\text{CO} + \text{OH}$ se produciría si las concentraciones de NO_x son suficientemente altas para que cada radical HO_2 reacciona con NO en lugar de con sí mismo y la reacción $\text{OH} + \text{NO}_2$ es despreciable. El mecanismo resultante sería:



Esta condición no se puede lograr; si los niveles de NO_x son lo suficientemente altos para mantener HO_2 de que reaccione con sí mismo, sino que también son suficientemente altos, de tal manera que algunas moléculas de NO_2 deberían reaccionar con OH para formar HNO_3 , terminando con ello la reacción en cadena.

➤ Química atmosférica del CH₄

La química de la troposfera está dominada por la de CO y CH₄. Regiones donde las emisiones humanas influyen de manera significativa en la composición de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera, la química es más compleja que la de CO y CH₄. A pesar de las complejidades que surgen como resultado de las moléculas más grandes, los elementos básicos de la química son similares a los de CO y CH₄: iniciación por ataque OH, formación de O₃ como resultado de reacciones peroxi radicales-NO, y la terminación por reacciones HO_x + HO_x y HO_x + NO_x. En la figura 24 se muestra la cadena de oxidación del metano (CH₄):

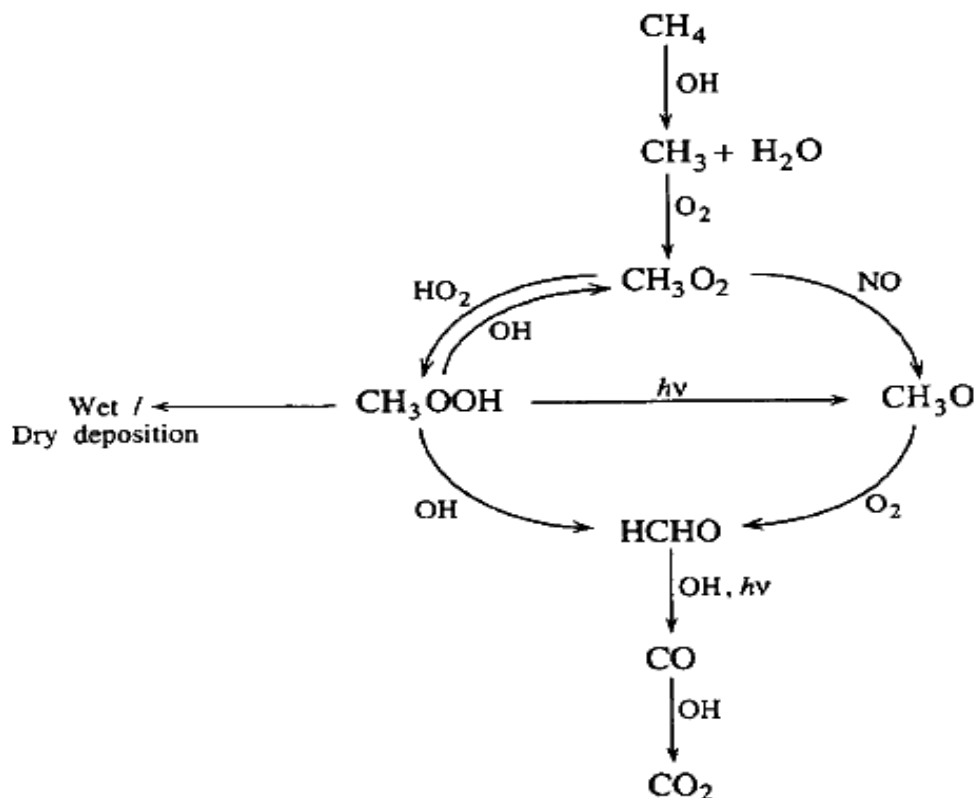


Figura 24. Oxidación atmosférica del CH₄ (23)

SMOG FOTOQUÍMICO

Efecto combinado del estancamiento de la masa de aire con una fuerte emisión de contaminantes (emisiones de motores diesel y/o a nafta, calefacción doméstica y actividad industrial). Cuando bajo determinadas condiciones meteorológicas se observa una baja velocidad ascendente u horizontal del aire, prolongada durante varias horas y combinada con una humedad relativa mayor del 60% se forma el llamado Smog clásico, mezcla toxica de hollín (partículas grasas carbonosas de color negro), humo (compuesto principalmente por CO, CO₂, SO₂, NO_x), material particulado, y niebla (aerosol líquido que disminuye la visibilidad). Los efectos del SMOG clásico sobre la salud comprenden catarro e irritación de las mucosas de las vías aéreas superiores e irritación de la piel por exposición a la niebla acida (SO₂ y NO_x disueltos en el vapor de agua).

El Smog fotoquímico (Figura 25) ocurre cuando los contaminantes atmosféricos forman una mezcla gaseosa capaz de sufrir reacciones fotoquímicas en presencia de la luz solar (principalmente UV) generándose peligrosos contaminantes secundarios a partir de los contaminantes “clásicos”. Entre ellos se encuentran el ozono (O_3), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y los compuestos conocidos como PAN (nitratos de peroxiacilo). Cuando los PAN forman parte de la niebla, se asocian a las partículas usualmente presentes, dándole un aspecto brumoso amarillento característico. En la niebla también puede darse la reacción $SO_2 + \text{niebla}$ (NH_4) $_2SO_4$ formándose partículas de diámetros mayores a 10 micrones que afectan las fosas nasales. Partículas intermedias (5 micrones) como las del SO_2 afectan las mucosas de las vías superiores, boca, fosas nasales, rinofaringe y tráquea. Partículas finas (menos de 3 micrones) como el ozono y el NO_2 son captadas por los macrófagos en los alveolos pulmonares provocando un medio propicio a las sobreinfecciones (23).

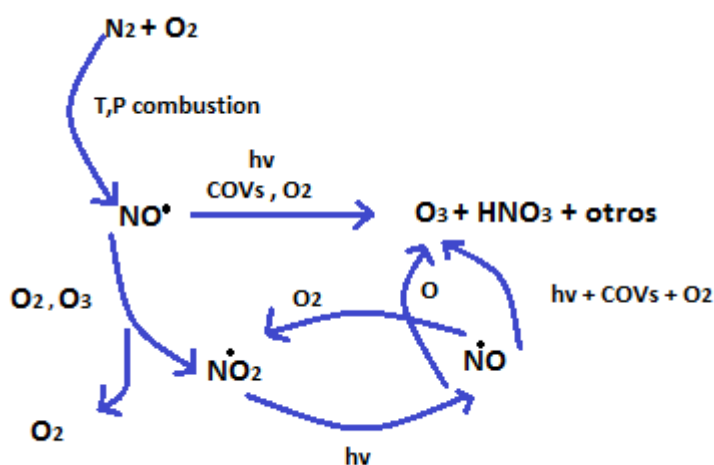


Figura 25: Mecanismo de formación del smog fotoquímico

LLUVIA ÁCIDA

La lluvia es una de las partes del ciclo del agua: se evapora agua de la superficie terrestre formando nubes de vapor, que al entrar en contacto con una corriente de aire frío condensa formando gotitas que aumentan de tamaño hasta que caen (precipitan). Es una experiencia natural que puede asimilarse a la operación de destilar agua en el laboratorio. Pero mientras que el agua destilada tiene pH 7, el agua de lluvia normalmente tiene un pH de 5,6 debido a la presencia de CO_2 disuelto:

Se llama lluvia ácida aquella cuyo pH es menor de 5,6 y esto puede ocurrir por distintos mecanismos de deposición húmeda de compuestos contaminantes presentes en la atmósfera y que generan la formación de ácidos en presencia de agua. Mecanismos de deposición húmeda:

- Agregación: incorporación de sustancias a las gotitas y cristales de las nubes.
- Derrubio: barrido del material que se encuentra bajo las nubes durante la precipitación de lluvia nieve.

Los compuestos que determinan la lluvia ácida pueden ser SO_2 y NO_x , ya sean de origen natural ó antropogénico, los cuales forman, en disolución acuosa, H_2SO_4 y HNO_3 .

SO₂ y otros compuestos azufrados

En la atmósfera es normal su presencia en cantidad de trazas, pero aún en tan bajas cantidades tienen gran impacto por la producción, a nivel local de la lluvia ácida. Los compuestos azufrados más comúnmente presentes en la atmósfera son SO₂, COS (sulfuro de carbonilo), CS₂ (disulfuro de carbono), RSR (sulfuros orgánicos gaseosos), y el H₂S. Se incorporan a la atmósfera por vulcanismo (SO₂, COS, SO₄²⁻, H₂S), erosión eólica de rocas ricas en sulfatos, formación de RSR en la zona fática de los océanos, degradación de biomasa (CH₃HS, COS, CS₂).

Además de estos motivos naturales, la actividad humana genera el 25 % del SO₂ presente en la atmósfera, como consecuencia de la combustión de los combustibles fósiles con alto contenido de azufre. En la atmósfera estos compuestos participan de una serie de reacciones de cinética compleja que se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- a) Oxidaciones homogéneas: donde participan otros compuestos gaseosos de la atmósfera. Estas transformaciones ocurren en presencia de O₃, O₂, o radicales como HO, HO₂
- b) Oxidaciones Heterogéneas: El SO₂ se disuelve en H₂O (l) presente como gotitas en la atmósfera o se absorbe en aerosoles (por ej. hollín), formándose SO₃²⁻ y HSO₃⁻ que en presencia de catión Fe³⁺, Mg²⁺ ó Ca²⁺, que actúan como catalizadores, reaccionan con el ozono ó con el oxígeno formando SO₄²⁻.

La formación de ácido sulfúrico atmosférico puede darse por dos mecanismos distintos

- SO₂, h^{1/2} en presencia de O₂ u O₃ SO₃ H₂O
- SO₂ en presencia de radicales HO, HO₂

El ácido sulfúrico en la atmósfera se encuentra como una suspensión coloidal (líquida).

Contaminación del aire por nitrógeno: NO_x y otros

Con la denominación genérica de NO_x los ambientalistas se refieren a los óxidos contaminantes del nitrógeno, los cuales contribuyen a la formación del smog fotoquímico, a la lluvia ácida y al efecto invernadero. Se trata principalmente de NO y NO₂, y su presencia en el aire, junto al NH₃ y otros contaminantes nitrogenados, puede deberse a los siguientes motivos:

- Emisiones volcánicas: pueden emitir NO_x y NH₃ hasta la estratosfera inclusive. Si se acumulan en la troposfera contribuyen al efecto invernadero. También, por distintos mecanismos pueden transformarse en ácido nítrico atmosférico, al reaccionar los NO_x atmosféricos con distintos radicales libres
- Procesos biológicos: constituyente esencial de los seres vivos, el ciclo del nitrógeno es parte fundamental del equilibrio químico del planeta.
- Fuentes antropogénicas: durante los procesos de combustión de hidrocarburos a altas temperaturas en presencia de aire puede ocurrir que

En el caso de autos y otros medios de transporte, estas emisiones se reducen utilizando conversores catalíticos para los gases de escape, principalmente Al₂O₃ con platino, paladio o rodio, los cuales catalizan las siguientes reacciones.

Daños ocasionados por la lluvia ácida

- Acción corrosiva sobre los metales y materiales de construcción.
- Acción perjudicial sobre la salud de las personas.
- Acidificación del suelo, el SO_4^{2-} se combina con los cationes del suelo, dejando H^+ en su lugar.
- Escurrimientos ácidos desde el suelo a las cuencas hídricas, con aumento de la concentración de metales y disminución del pH en las mismas, poniendo en riesgo la continuidad de las especies.
- Puede fluir a las napas acuíferas y llegar a los lagos, alterando la biota acuática.
- Cuando los bosques se ven afectados por la lluvia ácida sufren una visible pérdida de vitalidad.
- En presencia de radicales libres en la atmósfera el tiempo de vida media de los NO_x es 1 día y del SO_2 es de 7,7 días.

EFFECTO INVERNADERO Y CAMBIO CLIMÁTICO

Básicamente toda la energía que llega a la Tierra proviene del Sol. La absorción y pérdida de energía radiante por la Tierra y la atmósfera son casi totalmente responsables del clima de la Tierra (a escalas globales y locales). La temperatura media de la Tierra se mantiene bastante constante, lo que indica que la Tierra y la atmósfera en general pierden tanta energía por radiación que vuelve al espacio, como recibida por la radiación del sol. La cuantificación de la energía radiante de entrada y salida constituye el balance energético de la Tierra (figura 26).

La atmósfera, aunque puede parecer ser transparente a la radiación, juega un papel muy importante en el balance de energía de la Tierra. De hecho, la atmósfera controla la cantidad de radiación solar que llega realmente a la superficie de la Tierra y, al mismo tiempo, controla la cantidad de radiación terrestre saliente que se escapa al espacio.

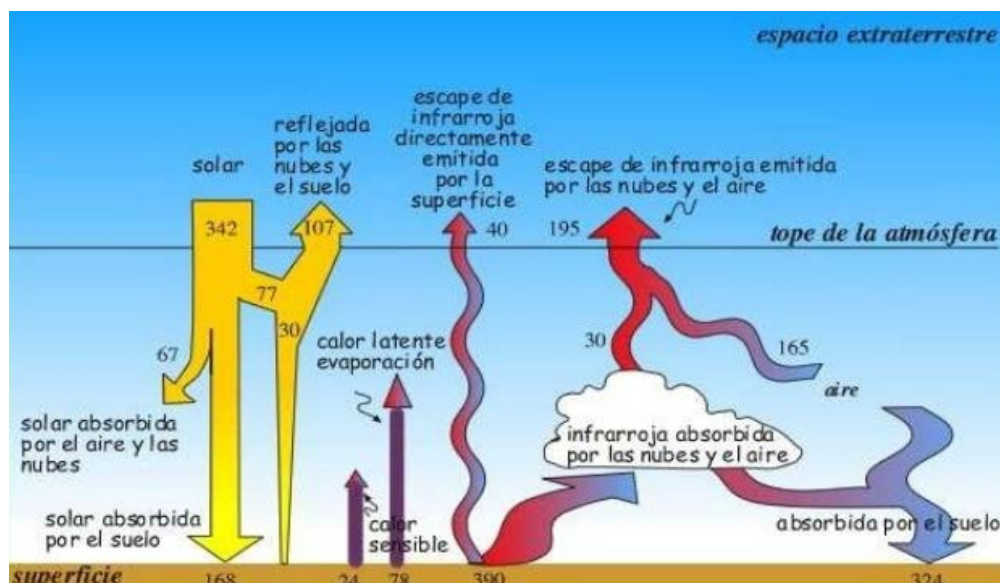


Figura 26. Balance energético terrestre

La energía radiante, clasificados por orden de sus longitudes de onda (λ), se llama el espectro de la radiación (Figura 27). El sol irradia en todo el espectro electromagnético, aunque la mayor parte de la energía se concentra cerca de la porción visible del espectro, la banda de longitudes de onda de 400 a 700 nm (0,4 a 0,7 micras).

Nuestro interés se limita a la llamada región óptica, que se extiende sobre el ultravioleta próximo, el visible y el infrarrojo cercano, el rango de longitud de onda de 200 nm a 100 micras. Esta gama cubre la mayor parte de la radiación solar y la emitida por la superficie y la atmósfera de la Tierra. Tres medidas relacionadas entre sí se utilizan para especificar la ubicación en el espectro electromagnético, la longitud de onda λ , la frecuencia ν , y el número de onda $\nu = \lambda^{-1}$.

La frecuencia y la longitud de onda están relacionadas por $\nu = c/\lambda$, donde c es la velocidad de la luz. En la parte ultravioleta y visible del espectro, es común caracterizar la radiación por su longitud de onda, expresado ya sea en nanómetros (nm) o micrómetros (micras). En la parte infrarroja del espectro, se utiliza con frecuencia el número de onda (cm^{-1}).

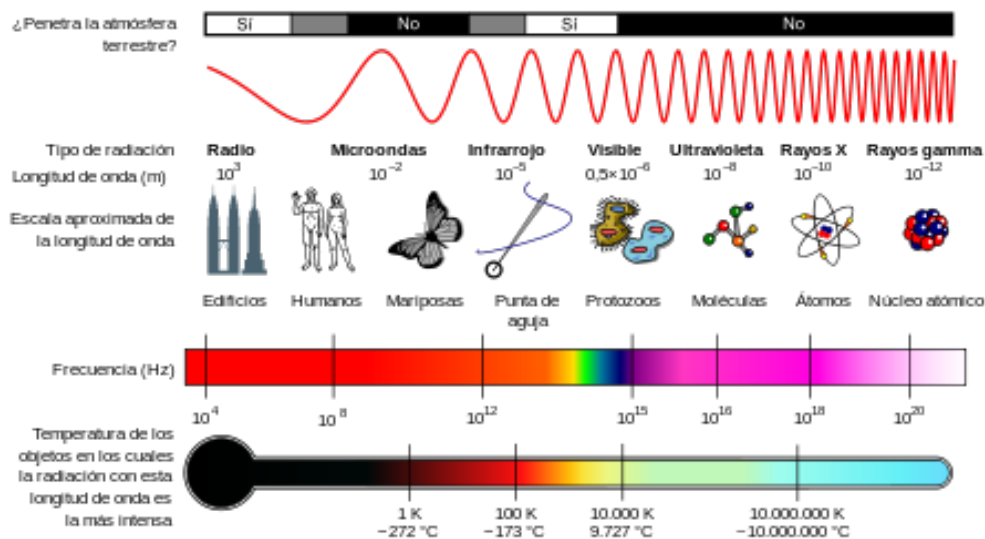


Figura 27. Espectro electromagnético

Efecto Invernadero

La absorción de energía por un determinado gas tiene lugar cuando la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura.

La atmósfera es un fluido constituido por diferentes tipos de gases y cada uno de ellos se comporta de manera diferente, de manera tal, que la energía absorbida la efectúan selectivamente para diferentes longitudes de onda y en algunos casos son transparentes para ciertos rangos del espectro. La atmósfera principalmente tiene bajo poder de absorción o es transparente en la parte visible del espectro, pero tiene un significativo poder de absorción de radiación ultravioleta o radiación de onda corta procedente del sol y el principal responsable de

este fenómeno es el ozono, así mismo, la atmósfera tiene buena capacidad para absorber la radiación infrarroja o de onda larga procedente de la Tierra y los responsables en este caso son el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases traza como el metano y el óxido nitroso.

Los gases que son buenos absorbedores de radiación solar son importantes en el calentamiento de la atmósfera, por ejemplo, la absorción de radiación solar por el ozono proporciona la energía que calienta la estratosfera y la mesosfera.

La absorción de radiación infrarroja procedente de la Tierra es importante en el balance energético de la atmósfera. Esta absorción por los gases traza, calienta la atmósfera, estimulándolos a emitir radiación de onda más larga. Parte de esta radiación es liberada al espacio y otra parte es irradiada nuevamente a la superficie de la Tierra (figura 28). Las dos terceras partes de la energía radiante atmosférica son directamente devueltas a la superficie, suministrando una fuente de energía adicional a la radiación solar directa.

El efecto neto de este fenómeno permite que la Tierra almacene más energía cerca de su superficie que la cantidad que podría almacenar si la Tierra no tuviera atmósfera, consecuentemente, la temperatura es más alta, del orden de 33°C más. Este proceso es conocido como el efecto de invernadero natural. Sin el efecto invernadero la temperatura promedio en la superficie sería aproximadamente de 18°C bajo cero y la vida en el planeta no sería posible.

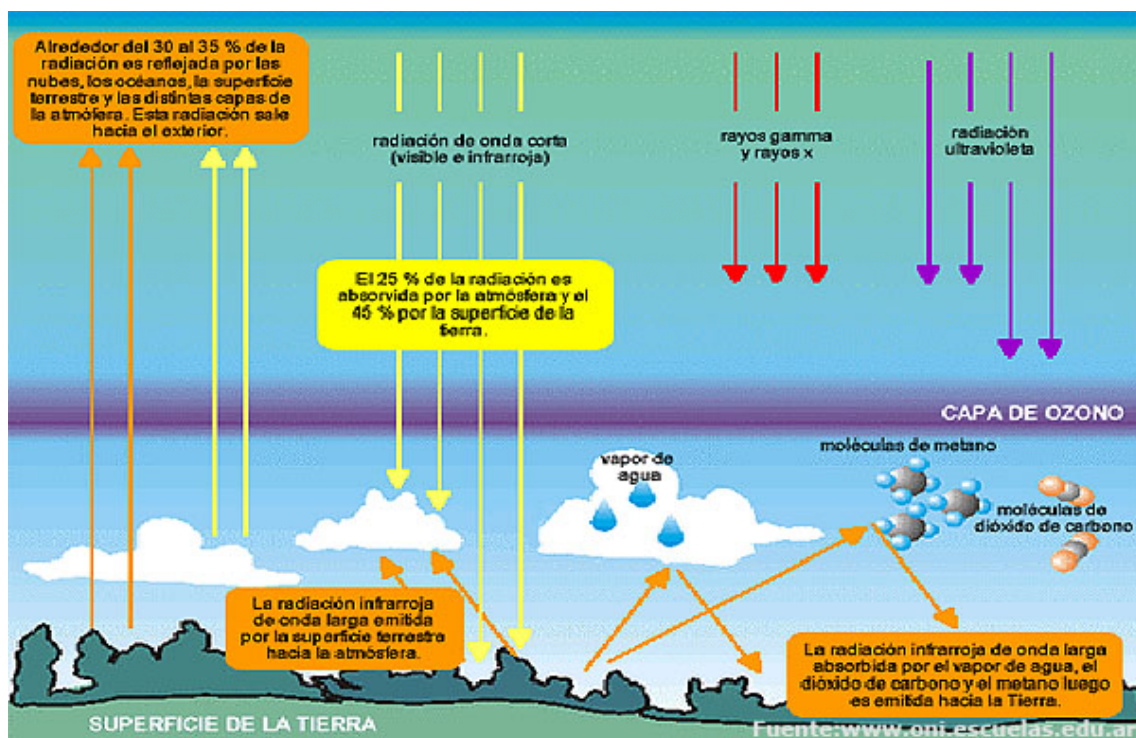


Figura 28. Esquema efecto invernadero

Consecuentemente, los gases en la atmósfera que absorben la radiación infrarroja procedente de la Tierra o radiación saliente, son conocidos como Gases de Efecto Invernadero (GEI), entre ellos se encuentran el dióxido de carbono, el vapor de agua, el óxido nitroso, el metano y el ozono. Estos gases tienen moléculas cuya frecuencia vibracional se localiza en la parte infrarroja del espectro.

Algunos gases emitidos por actividades humanas (denominados Gases de Efecto Invernadero - GEI) como el dióxido de carbono, el óxido nitroso, el metano, algunos halocarbonos (como los CFCs, HCFCs, HFCs y los PFCs), así como el ozono troposférico (el cual se forma a partir del monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y otros compuestos orgánicos volátiles), son buenos absorbentes de la radiación infrarroja y específicamente los halocarbonos porque muchos de ellos absorben energía en la región de longitudes de onda donde la energía no es absorbida por el dióxido de carbono ni el vapor de agua (región denominada como ventana atmosférica).

Cambios en la concentración atmosférica de los GEI y aerosoles, en la radiación solar y en las propiedades superficiales del suelo afectan la absorción, dispersión y emisión de la radiación dentro de la atmósfera y en la superficie de la tierra. Los resultados positivos o negativos en el balance energético debido a estos factores son expresados como forzamiento radiativo, el cual es usado para comparar la influencia del calentamiento o el enfriamiento sobre el sistema climático.

El forzamiento radiativo es una medida de la influencia que tiene la alteración del balance entre la radiación solar incidente y la radiación infrarroja saliente en el sistema atmósfera – Tierra, denotado por un cambio en la irradiancia neta en la tropopausa y es expresado en vatios por metro cuadrado (Wm^{-2}). Generalmente los valores del forzamiento radiativo son para cambios relativos a las condiciones definidas en 1970. Estas perturbaciones se deben a cambios internos o forzamientos externos del sistema climático, como por ejemplo, cambios en la concentración de un GEI o en la radiación emitida por el sol.

Un forzamiento radiativo positivo tiende a calentar la troposfera (capa de la atmósfera desde la superficie hasta cerca de 16km de altura) y uno negativo tiende a enfriarla. El agotamiento de la capa de ozono debido a su destrucción por el incremento en las emisiones de halocarbonos desde 1970, ha representado un forzamiento radiativo negativo del sistema climático, ya que, el ozono es un GEI. Por otro lado, el incremento de los GEI ha producido un forzamiento positivo. Se estima que el efecto neto promedio a nivel global de las actividades humanas desde 1750 ha sido un calentamiento con un forzamiento radiativo de $1,6 \text{ Wm}^{-2}$.

El forzamiento radiativo de los GEI y el ozono se presenta en la Figura 29 y su magnitud está dada por el producto de su concentración y su eficiencia radiactiva (energía absorbida por unidad de concentración $\text{Wm}^{-2} \cdot \text{ppb}$). El CO_2 es el que más ha contribuido al forzamiento radiativo positivo con $1,66 \text{ Wm}^{-2}$, seguido por el CH_4 con $0,48 \text{ Wm}^{-2}$, el ozono troposférico con $0,35 \text{ Wm}^{-2}$, el N_2O con $0,16 \text{ Wm}^{-2}$ y algunos halocarbonos. El forzamiento radiativo del CO_2 se ha incrementado en un 20% durante los últimos 10 años (1995-2005), siendo el cambio más grande observado o inferido para una década en los últimos 200 años.

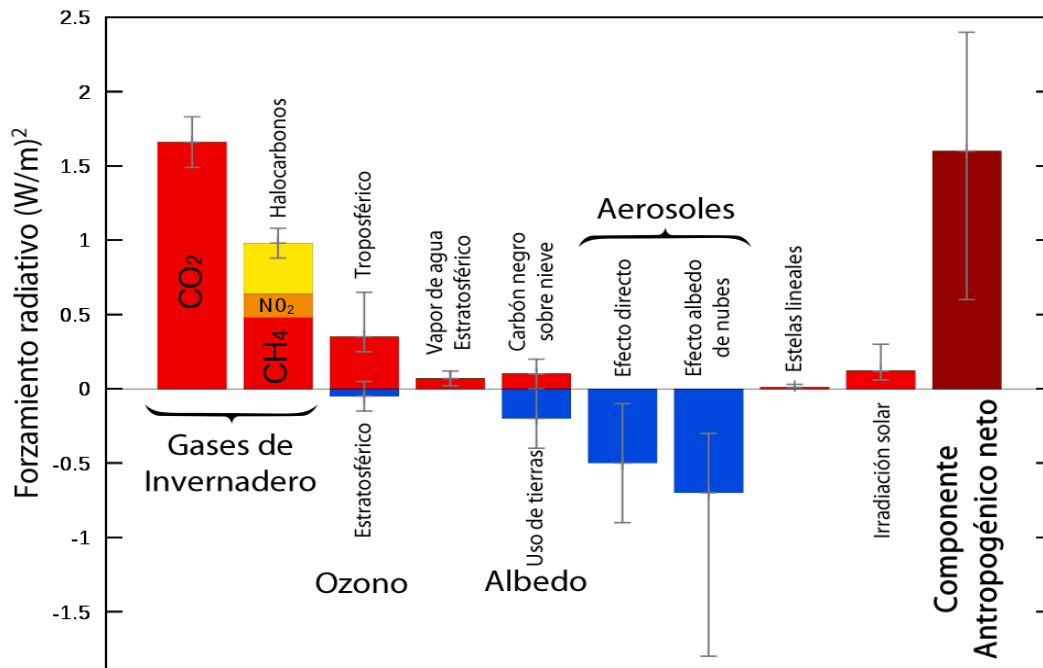


Figura 29. Forzamiento radiativo

Otros agentes que contribuyen al forzamiento radiativo son los cambios en los aerosoles troposféricos, cambios en el albedo superficial y en la radiación emitida por el sol. Respecto a este último ítem, se estima que los cambios en la radiación solar desde 1750 han generado un forzamiento radiativo de $0,12 \text{ Wm}^{-2}$.

Los aerosoles de origen antropogénico (principalmente sulfatados, carbón orgánico, carbón negro, nitratos y polvo) producen un forzamiento radiativo directo de $-0,5 \text{ Wm}^{-2}$ y un forzamiento de albedo indirecto de nube de $-0,7 \text{ Wm}^{-2}$. Los aerosoles tienen influencia en el tiempo de vida de las nubes y en la precipitación.

Los cambios en el albedo superficial debido a los cambios en la cobertura del suelo y a la deposición de aerosoles negros de carbón sobre la nieve ejercen forzamientos de $-0,2 \text{ Wm}^{-2}$ y $+0,1 \text{ Wm}^{-2}$ respectivamente.

Entre los compuestos halogenados, los CFCs han contribuido al forzamiento radiativo positivo desde el año 1750 con $0,28 \text{ Wm}^{-2}$, mientras que los HCFCs con $0,033 \text{ Wm}^{-2}$ y los HFCs con $0,007 \text{ Wm}^{-2}$. Los incrementos en las concentraciones de los gases halocarbonados entre el año 1970 y el 2000 han contribuido con cerca del 30% del incremento del forzamiento radiativo relacionado a los GEI durante este periodo.

Las moléculas de halocarbonos pueden ser miles de veces más eficientes como absorbentes de energía emitida por la tierra que una molécula de dióxido de carbono y pequeñas cantidades de estos gases pueden contribuir apreciablemente al forzamiento radiativo del sistema climático.

El efecto radiativo del CO₂ y el vapor de agua es calentar el clima superficial y enfriar la estratosfera, mientras que el efecto radiativo de los halocarbonos es calentar la troposfera y la estratosfera debido a su absorción en la ventana atmosférica.

En la tabla 11 se observa para varios gases el potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés: Global Warming Potentials), el cual es un indicador del efecto radiativo de una sustancia sobre un horizonte de tiempo escogido, teniendo como base al CO₂.

El GWP es más alto para las especies que absorben mayor radiación o tienen grandes tiempos de vida media. El horizonte de tiempo escogido generalmente es de 100 años, queriendo representar el futuro impacto de la sustancia en los próximos 100 años.

Tabla 11: potencial de calentamiento global (GWP) de los GEI

GEI	GWP después de 20 años	GWP después de 20 años
CO₂	1	1
CH₄	62	23
NO_x	275	296
HFC-23	9400	12000
HFC-125	5900	3400
HFC-134a	3300	1300
HFC-143a	5500	4300
CF₄	3900	5700
C₂F₆	8000	11900
SF₆	15100	22200

Cambio Climático

De acuerdo a la Convención Marco sobre Cambio Climático (CMCC), el cambio climático se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables. Por otro lado, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como cualquier cambio en el clima con el tiempo, debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas.

Desde el punto de vista meteorológico, se llama Cambio Climático, a la alteración de las condiciones predominantes. Los procesos externos tales como la variación de la radiación solar, variaciones de los parámetros orbitales de la Tierra (la excentricidad, la inclinación del eje de la tierra con respecto a la eclíptica), los movimientos de la corteza terrestre y la actividad volcánica, son factores que tienen gran importancia en el cambio climático. Procesos internos del sistema climático también pueden producir cambios de suficiente magnitud y variabilidad a través de interacciones entre sus elementos. El clima de la Tierra depende del equilibrio radiativo de la atmósfera, el cual depende a su vez de la cantidad de la radiación solar que ingresa al sistema y de la concentración atmosférica de algunos gases variables que ejercen un efecto invernadero natural (gases traza con actividad radiactiva, nubes y aerosoles). Estos agentes de forzamiento radiativo varían tanto de forma natural como por la actividad humana, produciendo alteraciones en el clima del planeta (Figura 30).

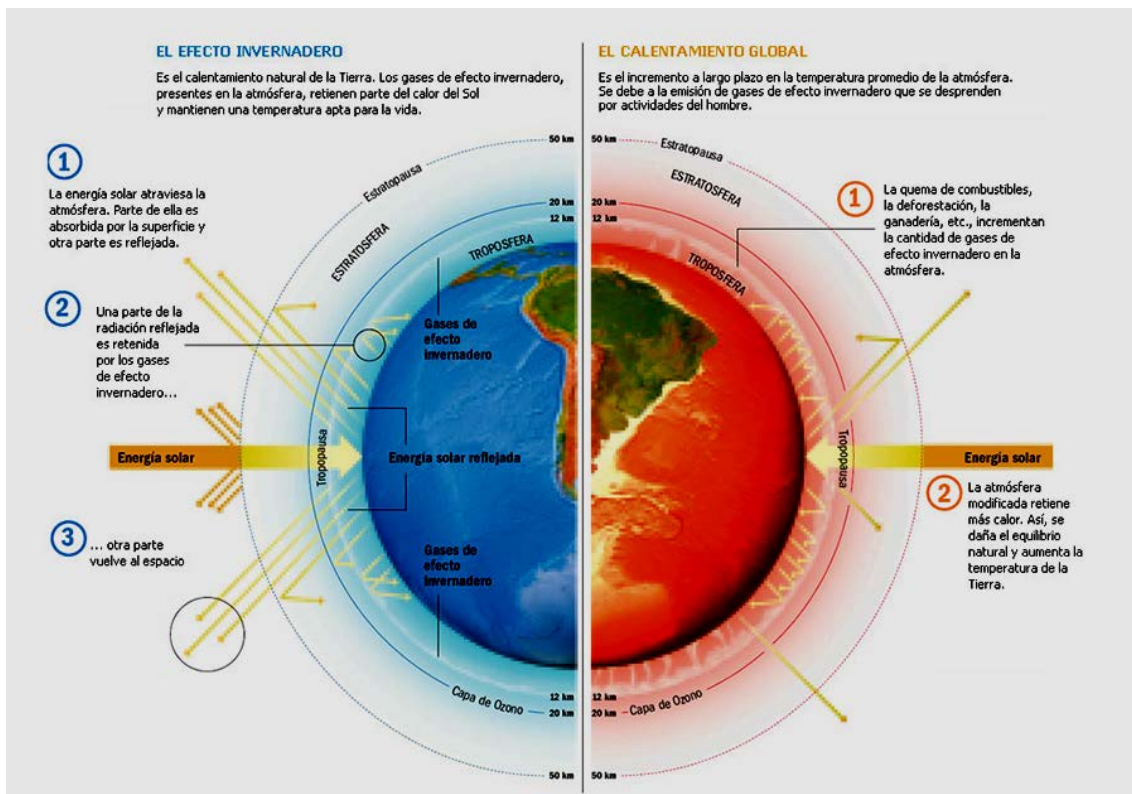


Figura 30. Efecto invernadero natural y su formación que induce al calentamiento global (aumento de la temperatura superficial a nivel global)

El cambio climático es, en parte, producto del incremento de las emisiones de GEI. No obstante existe una diferencia entre variabilidad climática (ej. el fenómeno del Niño) y cambio climático. La variabilidad climática se presenta cuando con cierta frecuencia un fenómeno genera un comportamiento anormal del clima, pero es un fenómeno temporal y transitorio. El cambio climático, por otra parte, denota un proceso que no es temporal y que puede verificarse en el tiempo revisando datos climáticos (ej. la temperatura).

Un enfoque integrado del cambio climático tiene en cuenta la dinámica del ciclo completo de causas y efectos interrelacionados en todos los sectores afectados. En el siguiente esquema se presenta un marco de evaluación integrado para la consideración de los cambios climáticos antropogénicos según se reporta en el TAR (Tercer Reporte de Evaluación del IPCC). Las flechas amarillas muestran el ciclo de causa a efecto entre los cuatro cuadrantes y la flecha azul indica la respuesta de la sociedad ante los impactos del cambio climático.

La adopción de decisiones sobre el cambio climático es esencialmente un proceso secuencial que se desarrolla en condiciones de incertidumbre general.

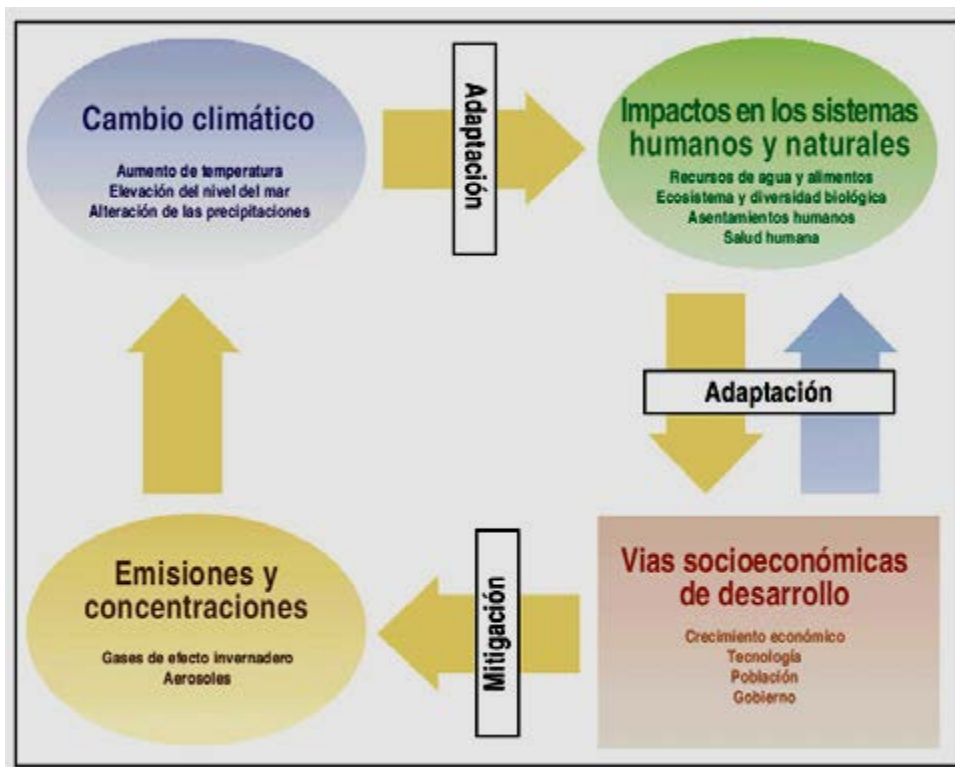


Figura 31. Enfoque integrado del cambio climático (IPCC, tercer reporte de evaluación, 2001)

El calentamiento global se puede entender en forma simplificada como el incremento gradual de la temperatura del planeta como consecuencia del aumento de la emisión de ciertos gases de Efecto Invernadero (GEI) que impiden que los rayos del sol salgan de la tierra, bajo condiciones normales. (Una capa “más gruesa” de gases de efecto invernadero retiene más los rayos infrarrojos y hace elevar la temperatura).

Por otro lado, es un término utilizado habitualmente en dos sentidos. Es el fenómeno observado que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas. También es una teoría que predice, a partir de proyecciones basadas en simulaciones computacionales, un crecimiento futuro de las temperaturas. La opinión científica mayoritaria sobre el cambio del clima dice que “la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 100 años, es atribuible a la actividad humana”. Las simulaciones parecen indicar que la principal causa del componente de calor inducido por los humanos se debería al aumento de dióxido de carbono. La temperatura del planeta ha venido elevándose desde finales del siglo XIX, cuando se puso fin a la etapa conocida como la pequeña edad de hielo. Calentamiento global y efecto invernadero no son sinónimos. El efecto invernadero acrecentado por la contaminación, puede ser, según las teorías, la causa del calentamiento global observado.

Los gases de efecto invernadero (GEI) o gases de invernadero son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Esta propiedad produce el efecto invernadero. En la atmósfera de la Tierra, los principales GEI son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de

carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃). Hay además en la atmósfera una serie de GEI creados íntegramente por el ser humano, como los halocarbonos y otras sustancias con contenido de cloro y bromo, regulados por el Protocolo de Montreal como el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC). Están clasificados en GEI directos e indirectos:

- **GEI Directos:** Son gases que contribuyen al efecto invernadero tal como son emitidos a la atmósfera. En este grupo se encuentran: el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los compuestos halogenados.
- **GEI Indirectos:** Son precursores de ozono troposférico, además de contaminantes del aire ambiente de carácter local y en la atmósfera se transforman a gases de efecto invernadero directo. En este grupo se encuentran: los óxidos de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano y el monóxido de carbono.

Bibliografía

1. Ley Nacional 20.284/73- Rep. Argentina.
<http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/40000-44999/40167/norma.htm>
2. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. 1982. Red Panamericana de Muestreo de la Contaminación del Aire – REDPANAIRES. Informe final 1967-1980. Lima. CEPIS.
3. Wark, Kenneth & Warner, Cecil. (1990). Contaminación del aire, origen y control. México. Limusa & Noriega.
4. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Resolución 1327/2014.
<http://www.loa.org.ar/legNormaDetalle.aspx?id=26187>
5. Brauer et al. *School of Population and Public Health, Faculty of Medicine. UBC, Canadá.*
6. UNEP, 2015. <https://wedocs.unep.org/rest/bitstreams/11114/retrieve>
7. UNFPA, 2016. United Nation Population Fund. Disponible en:
<http://www.unfpa.org/pds/urbanization.htm>, accedido Septiembre 2016.
8. Parrish, D.D.; Kuster, W.C.; Shao, M.; Yokouchi, Y.; Kondo, Y.; Goldan, P.D.; de Goue, J.A.; Koike, M. and Shirai, T. (2009). Comparison of air pollutant emissions among megacities. *Atmospheric Environment*. 43(40):6435-6441
9. Air Quality Health Index Categories and Health Messages, <http://www.ec.gc.ca/cas-aqhi/default.asp?lang=En&n=79A8041B-1>.
10. Daily Air Quality Index, <https://uk-air.defra.gov.uk/air-pollution/daq?view=more-info>.
11. "Air Quality Index (AQI) - A Guide to Air Quality and Your Health",
12. <https://www.airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>.
13. Martínez, E & Díaz Y. (2004). Contaminación atmosférica. Colección Ciencia y Técnica Castilla La Mancha. Ediciones de la Universidad de Castilla – La Mancha.
14. Sbarato, D. 2007. Predicción y evaluación de impactos ambientales sobre la atmósfera. Córdoba Argentina. Centro de investigación y formación en salud ambiental. Universidad Nacional de Córdoba. Encuentro Grupo Editor.
15. Zaror, C.A. (2000) Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos, Universidad de Concepción, Santiago de Chile.
16. Zhang H.B., Luo Y.M., Wong M.H., Zhao Q.G., Zhang GL (2006) Distributions and concentrations of PAHs in Hong Kong soils. *Environmental Pollution* 14(1): 107-114.
17. Morillo E., Romero A.S., Madrid L., Villaverde J., Maqueda C. (2008) Characterization and Sources of PAHs and Potentially Toxic Metals in Urban Environments of Sevilla (Southern Spain). *Water Air Soil Pollution* 187: 41-51.

18. Daly GL., Lei Y.D., Castillo L.E., Muir D.C.G., Wania F. (2007) Polycyclic aromatic hydrocarbons in Costa Rican air and soil: A tropical/temperate comparison. *Atmospheric Environment* 41: 7339-7350.
19. Ma L., Chu S., Cheng H., Wang X., Liu X., Xu X. (2005) Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in subsoil from outskirts of Beijing, People's Republic of China. *Geoderma* 129: 200-210.
20. Cai Q.Y., Mo C.H., Wua Q.T., Katsoyiannis A., Zeng Q.Y. (2008) The status of soil contamination by semivolatile organic chemicals (SVOCs) in China: A review. *Science of the Total Environment* 389: 209-224.
21. Maliszewska B.K., Smreczak B., Klimkowicz A. (2009). Concentrations, sources, and spatial distribution of individual polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soils in the Eastern part of the EU: Poland as a case study. *Science of Total Environment* 407: 3746-3753.
22. Instituto Nacional de Ecología (2005). Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
23. Henry J.G. and Heinke G.W., (1999). *Ingeniería Ambiental*, 2º Edición. Editorial Prentice Hall, México, 777p.
24. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, Second Edition, by John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis. Copyright (2006) John Wiley & Sons, Inc.
25. Bates, D. R., and Nicolet, M. (1950). The photochemistry of atmospheric water vapor, *J. Geophys. Res.* 55, 301-327.
26. Farman, J. C., Gardiner, B. G., and Shanklin, J. D. (1985) Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature* 315, 207-210.
27. Molina, L. T., and Molina, M. J. (1987) Production of Cl₂O₂ from the self-reaction of the ClO radical, *J. Phys. Chem.* 91, 433-436.

Los autores

Andrés Porta

Licenciado en Ciencias Bioquímicas y Doctor en Ciencias Bioquímicas, FCE, UNLP. Profesor Titular ordinario de Química Analítica Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP. Investigador Independiente en temas vinculados con la contaminación ambiental y los efectos en la salud, en la Comisión de Investigaciones Científicas, provincia de Buenos Aires, en el Centro de Investigaciones del Medio Ambiente (CIMA), FCE, UNLP. Director del Centro de Investigaciones del Medio Ambiente. Director de proyectos de investigación y extensión, aprobados y financiados por UNLP, CIC PBA, MinCyT (Cooperación internacional) y FonCyT. Director de tesis de doctorado y de maestría, y de becas de CIC, PBA, CONICET y UNLP. Publicó 69 trabajos en revistas científicas internacionales, capítulos de libros y proceedings; y presentó unos 150 trabajos en eventos científicos nacionales e internacionales. Fue Profesor Adjunto de Química Analítica y Modelos de distribución de contaminantes ambientales, en FCE y Director del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería, UNLP (2007-2013).

Yanina Sanchez

Doctora en Ciencias Exactas, Facultad de Ciencias Exactas (FCE, UNLP). Profesora Adjunta ordinaria de Química y Contaminación Atmosférica, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP. Profesora Adjunta interina de Modelos de distribución de contaminantes ambientales, en FCE. Investigadora asistente CONICET en temas vinculados con el desarrollo de modelos de distribución de contaminantes en la atmósfera, en el CIMA. Directora de proyectos de investigación y extensión, aprobados y financiados por UNLP. Directora de tesis de doctorado y maestría; y de becas de CONICET y UNLP. Publicó unos 25 trabajos en revistas científicas internacionales, capítulos de libros y proceedings; y presentó unos 45 trabajos en eventos científicos nacionales e internacionales.

Esteban Colman Lerner

Doctor en Ciencias Exactas, Facultad de Ciencias Exactas, (FCE, UNLP). Profesor Adjunto ordinario de Química Analítica en la UN Arturo Jauretche y JTP de Química Analítica en la Facultad de Ciencias Exactas, UNLP. Investigador Asistente CONICET en temas vinculados con el desarrollo de catalizadores para abatir contaminantes del aire en el CINDECA.

Director de proyectos de investigación y extensión, aprobados y financiados por UNLP.
Director de tesis de doctorado y maestría y de becas de CONICET y UNLP.
Publicó unos 35 trabajos en revistas científicas internacionales, capítulos de libros y proceedings y presentó unos 60 trabajos en eventos científicos nacionales e internacionales.

Laura Massolo

Doctora en Ciencias Exactas, Facultad de Ciencias Exactas (FCE, UNLP).
Profesora de “Gestión y Diagnóstico Ambiental”, de la Licenciatura en Química y Tecnología Ambiental.
Investigadora del CIMA, FCE, UNLP, en temas relacionados con la exposición a contaminantes atmosféricos y factores de riesgo asociados a la calidad de aire.
Jefa del Área de Efluentes Gaseosos, Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS) de la Provincia de Buenos Aires.
Miembro de la Comisión Revisora Permanente del Decreto Reglamentario 3395/96 en referencia a la calidad del aire de la provincia de Buenos Aires.
Fue JTP de “Modelos de Dispersión y Distribución de Contaminantes”, FCE, UNLP y representante por la provincia de Buenos Aires en la Comisión de Calidad de Aire del ente interjurisdiccional Autoridad de Cuenca Matanza-Riachuelo (ACUMAR).
Participó en los talleres sobre “Actividades de Apoyo al Convenio de Estocolmo para la elaboración de un Plan Nacional de Aplicación”. Fue integrante de la Comisión de Calidad de Aire del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
Publicó 23 trabajos en revistas científicas internacionales, capítulos de libros y proceedings y presentó 52 trabajos en eventos científicos nacionales e internacionales.
Realizó informes técnicos y anteproyectos legislativos referidos a calidad de aire y numerosas inspecciones y auditorías sobre efluentes gaseosos en empresas de distintos rubros.
Supervisó alrededor de 6500 informes de impacto sobre el recurso aire y Disposiciones de otorgamiento del permiso de descarga de efluentes gaseosos a la atmósfera en la Provincia de Buenos Aires.

María de los Ángeles Gutiérrez

Doctora en Ciencias Exactas, Facultad de Ciencias Exactas (FCE, UNLP).
JTP ordinario de Óptica Oftalmológica I y II, FCE.
Becaria posdoctorado CONICET en temas vinculados con los efectos de la contaminación del aire en salud ocular, en el CIMA.
Directora de proyectos de investigación y extensión, aprobados y financiados por UNLP.
Publicó unos 15 trabajos en revistas científicas internacionales, capítulos de libros y proceedings; y presentó unos 30 trabajos en eventos científicos nacionales e internacionales.

Marcos Orte

Licenciado en Tecnología Ambiental, UNICEN.

Becaria de doctorado del CONICET en temas vinculados con el monitoreo y análisis de contaminantes del aire, en el CIMA.

Doctorando de la Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.

Publicó unos 20 trabajos en revistas científicas internacionales, capítulos de libros y proceedings; y presentó unos 45 trabajos en eventos científicos nacionales e internacionales.

Daniela Giuliani

Licenciada en Química y Tecnología Ambiental, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.

Becaria de doctorado del CONICET en temas vinculados con el monitoreo y análisis de contaminantes del aire, en el CIMA.

Doctorando de la Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.

Publicó unos 10 trabajos en revistas científicas internacionales, capítulos de libros y proceedings; y presentó unos 20 trabajos en eventos científicos nacionales e internacionales.

Soledad Represa

Licenciada en Química y Tecnología Ambiental, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.

Becaria de doctorado del CONICET en temas vinculados con la evaluación de riesgo por exposición a contaminantes del aire, en el CIMA.

Doctorando de la Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.

Publicó unos 10 trabajos en revistas científicas internacionales, capítulos de libros y proceedings y presentó unos 20 trabajos en eventos científicos nacionales e internacionales.

Daniela Mellado

Ingeniera Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Mar del Plata.

Becaria de doctorado del FONCyT en temas vinculados con el desarrollo de modelos de dispersión de contaminantes en el aire, en el CIMA.

Doctorando de la Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.

Publicó 5 trabajos en revistas científicas internacionales, capítulos de libros y proceedings y presentó unos 10 trabajos en eventos científicos nacionales e internacionales.

Karina Balbi

Licenciada en Química y Tecnología Ambiental, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP y Licenciada en Bioquímica, UBA.

JTP de Modelos de distribución de contaminantes ambientales, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.

Publicó unos 5 trabajos en revistas científicas internacionales, capítulos de libros y proceedings y presentó unos 10 trabajos en eventos científicos nacionales e internacionales.

Myriam Aguilar

Estudiante avanzada de Ciencias Farmacéuticas, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.

Becaria del Ministerio de Salud, programa Carrillo – Oñativia, en temas vinculados con efectos de la exposición a contaminantes del aire, en el CIMA.

Publicó unos 20 trabajos en revistas científicas internacionales, capítulos de libros y proceedings; y presentó unos 40 trabajos en eventos científicos nacionales e internacionales.

Germán Castagnasso

Técnico en Industrias de Procesos, E.E.T. N6 Albert Thomas, La Plata. Estudiante avanzado de las carreras, Licenciatura en Química y Tecnología Ambiental Facultad de Ciencias Exactas UNLP y la Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera y Meteorología de la Facultad de Astronomía y Geofísica de la UNLP.

Se desempeña como Técnico Inspector en el Área de Efluentes Gaseosos, Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS) de la Provincia de Bs As.

Fue integrante en los proyectos de Extensión Universitaria de la Facultad de Ciencias Exactas UNLP, Taller de Control de Potabilización de Aguas y Taller de Calidad de Aire.

Colaborador en la asignatura Modelos de Dispersión y Distribución de Contaminantes, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP (2011-2015)

Miembro titular de la Comisión Revisora Permanente del Decreto Reglamentario 3395/96 en referencia a la calidad del aire de la Provincia de Bs As.

Representante por la Provincia de Bs As en la Comisión de Calidad de Aire del ente interjurisdiccional Autoridad de Cuenca Matanza-Riachuelo (ACUMAR).

Presentó numerosos trabajos en eventos científicos nacionales (conferencias, congresos, jornadas).

Dictó numerosos cursos de capacitación, diplomaturas y conferencias en materia de efluentes gaseosos industriales y calidad de aire, tanto a entes gubernamentales como privados.

Realizó informes técnicos y anteproyectos legislativos referidos a la calidad de aire en la Provincia de Bs. As.

Realizó alrededor de 160 inspecciones y auditorías sobre efluentes gaseosos en empresas de distintos rubros en la Provincia de Bs. As.

Elaboró alrededor de 1250 informes de impacto sobre el recurso aire y disposiciones de otorgamiento del permiso de descarga de efluentes gaseosos a la atmósfera en la Provincia de Bs. As.

Calidad del aire: monitoreo y modelado de contaminantes atmosféricos:
efectos en la salud pública / Porta, Andrés ... [et al.]; coordinación general de
Porta, Andrés; Yanina Sanchez; Esteban Colman Lerner. - 1a ed . - La Plata:
Universidad Nacional de La Plata; La Plata: EDULP, 2018.
Libro digital, PDF - (Libros de cátedra)

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-950-34-1682-2

1. Contaminación Atmosférica. 2. Calidad del Aire. 3. Salud Pública. I. Porta, Andrés, II. Porta,
Andrés, coord. III. Sanchez, Yanina, coord. IV. Colman Lerner, Esteban, coord.
CDD 354.3735

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP

Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata
47 N.º 380 / La Plata B1900AJP / Buenos Aires, Argentina
+54 221 427 3992 / 427 4898
edulp.editorial@gmail.com
www.editorial.unlp.edu.ar

Eduulp integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2018
ISBN 978-950-34-1682-2
© 2018 - Eduulp

e
exactas


Editorial
de la Universidad
de La Plata



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA