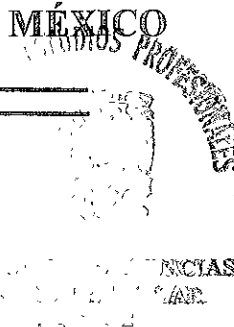


100
2 e j

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE CIENCIAS



OZONO: CAUSAS, EFECTOS Y SOLUCIONES EN LA ZMCM

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGA

PRESENTA:

CLAUDIA CECILIA MENDOZA GONZÁLEZ DE LA LLAVE

DIRECTOR DE TESIS:

DR. OCTAVIO A. NOVARO PEÑALOSA

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. HÉCTOR G. RIVEROS ROTGÉ



1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

26 007 2



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVÁNAMA DE
MEXICO

M. en C. Virginia Abrín Batule
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
P r e s e n t e

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis:

"Ozono: causas, efectos y soluciones en la ZMCM"

realizado por Claudia Cecilia Mendoza González de la Llave

con número de cuenta 9162525-0 , pasante de la carrera de Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

Dr. Octavio Novaro Peñalosa

Propietario

Dr. Héctor G. Riveros Rotge

Propietario

Dra. Patricia Guevara Fefer

Suplente

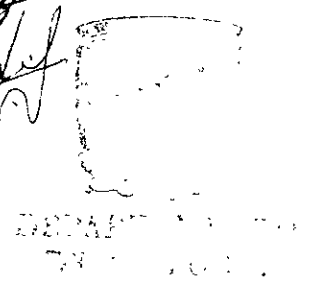
M. en C. Patricia Guadalupe Orozco Soto

Suplente

M. en C. Héctor M. Abundis Manzano

Consejo Departamental de Biología
M. en C. Alejandro Martínez Mena

FACULTAD DE CIENCIAS
C.I.P.A.M



Agradecimientos

Quiero agradecer a mis directores de tesis, al Dr. Novaro por abrirme las puertas del IFUNAM, por su apoyo y paciencia y al Dr. Riveros por enseñarme el arte de experimentar y por su invaluable amistad.

A todos los amigos que estuvieron conmigo hasta el final: a Pilar por mostrarme la magia de la química y por sus correcciones; a Jesús por su ayuda con algunas de las figuras que aparecen en la tesis y sus correcciones; a David por todo lo que aprendí de tí; a Sandra por las aventuras en las noches de arduo trabajo; al Dr. Cabrera por toda su ayuda en mis pininos en computación y por ser un gran hombre; a María Luisa por su ánimo constante.

A la UNAM por dar lo mejor de sí.

A mis padres por darme la vida y a mi hermano por ser único.

A mis sinodales que enriquecieron esta tesis con sus comentarios.

Índice

	Página
Introducción	I
Antecedentes	III
Objetivos	V
Metodología	V
<i>Capítulo 1</i>	
1.1. Ozono: definición	1
1.2. Ozono estratosférico	3
1.3. Ozono troposférico	6
1.3.1. Efectos del ozono en la vegetación	11
1.3.2. Efectos del ozono en la salud	14
1.3.2.1. Experimentos realizados con animales	16
1.3.2.2. Experimentos realizados con humanos	18
1.3.2.3. Inducción de hiperreactividad	21
1.3.2.4. Adaptabilidad	22
<i>Capítulo 2</i>	
2. La Contaminación en las metrópolis	23
2.1. Principales contaminantes de las metrópolis	24
2.2. Causas de contaminación en las metrópolis	26
2.2.1. Situación actual	27
2.2.2. Factores que agravan la contaminación por ozono en la ZMCM	32
2.3. Contaminación en la ZMCM	41
2.3.1. Factores de emisión del transporte de diferentes ciudades	41
2.4. Contaminación por ozono en la Ciudad de México	45
2.5. Datos sobre el grado de contaminación	46
2.5.1. Medición de contaminantes	46
2.6. Fuentes contaminantes	50
2.7. Fuentes secundarias de contaminación	53
2.7.1. El transporte en la ZMCM	54
2.7.2. Emisiones evaporativas	55
<i>Capítulo 3</i>	
3.1. Convertidores catalíticos	57
3.1.1. Funcionamiento de un motor	57
3.1.2. Tipos de convertidores	58
3.1.3. Manufactura de los convertidores catalíticos	62
3.1.4. Experimentos realizados	65
Conclusiones y sugerencias	76
Referencias	80
Apéndice	85

Índice de figuras

	Página
1. Promedio anual global de la distribución vertical de ozono	2
2. Representación esquemática de la formación de ozono	8
3. Órganos de la respiración	16
4. Zona Metropolitana de la Ciudad de México	27
5. Comparación de niveles de contaminantes en algunas ciudades	28
6. Sistema anticiclónico en la atmósfera superior	33
7. Efectos de un sistema anticiclónico	34
8. Sistema de alta presión en superficie	35
9. Parámetros de una inversión térmica	36
10. Efecto de isla de calor	38
11. Cuenca del Valle de México	40
12. Fracción de vehículos y su contribución de CO para la flota	42
13. Distribución de estaciones en la ZMCM de la RAMA	47
14. Representación esquemática del funcionamiento de convertidores catalíticos	58
15. Materiales para la fabricación de convertidores catalíticos	60
16. Emisión de contaminantes por un motor de gasolina	64
17. Emisión de contaminantes por una máquina de petróleo	64
18. Resultado de la utilización del convertidor HEU-1	69
19. Resultado de la utilización del convertidor HEU-2	70
20. Resultado de la utilización del convertidor RuPt 300	71
21. Resultado de la utilización del convertidor RuPt 350	72
22. Resultado de la utilización del convertidor TLG3-300	73
23. Resultado de la utilización del convertidor TLG3	74
24. Resultado de la utilización del convertidor Ru 300	75

Índice de Tablas

I.	Desarrollo de adenomas pulmonares en ratones expuestos a ozono	18
II.	Composición química del aire atmosférico	23
III.	Concentración de plomo en gasolinas de la ZMCM	26
IV.	a) Principales fuentes emisoras de hidrocarburos b) Principales fuentes emisoras de óxidos de nitrógeno	29 30
V.	Factores de emisión en diferentes países	43
VI.	Efectos del ozono en los seres vivos	45
VII.	Comparación entre el IMECA, índice de Ott y Thom y la norma NAAQS	48
VIII.	Concentraciones límite de la escala IMECA y criterios de calificación	48
IX.	Criterios de evaluación de la calidad del aire	49
X.	Consumo de combustibles en la ZMCM	50
XI.	Emisiones de contaminantes en la ZMCM	51
XII.	Edad de la flota vehicular en EUA y ZMCM	55

Introducción

El problema de contaminación data desde la prehistoria, cuando el hombre primitivo utilizó el fuego para cocinar sus alimentos, calentarse y limpiar los prados e introducir en ellos la agricultura y la ganadería. De esta manera, el hombre empezó a intervenir en los ecosistemas.

La naturaleza posee mecanismos de autoregulación que le permiten reciclar los desechos producidos, aunque tienen un límite, que al excederse, acumula los desechos originando contaminación. De forma natural se produce contaminación al haber incendios forestales, erupciones volcánicas y sobrepoblación de especies.

El incremento exponencial de la población humana y el desarrollo industrial, sobre todo en las últimas décadas ha traído como consecuencia nuevas formas de contaminación y a niveles y escala nunca antes vistos en el planeta. No solo las condiciones de vida del ser humano son afectadas por la contaminación, también lo son los ecosistemas y las obras materiales como edificaciones y obras de arte.

La Ciudad de México ha enfrentado un grave problema de contaminación atmosférica y es el ozono el contaminante que, en los últimos años, con mayor frecuencia sobrepasa las normas de seguridad establecidas (0.11ppm/hora ó 100 IMECAS). Por lo que se sabe hasta ahora, el nivel máximo de ozono alcanzado en esta ciudad (0.45ppm ó 400 IMECAS), puede causar daños a la salud y a la vegetación.

En el presente trabajo se estudian las reacciones fotoquímicas precursoras de la formación de ozono, las fuentes emisoras de contaminantes, las características geográficas, climáticas y demográficas de la Ciudad de México, además se realiza un estudio comparativo de los daños en la salud en plantas, animales (cobayos, perros, monos) y humanos.

Los automóviles se han convertido en la principal fuente contaminante de los precursores del ozono (hidrocarburos y óxidos de nitrógeno) en la Ciudad de México, debido a que no cuentan la mayoría, con sistemas anticontaminantes, por lo cual se analiza la eficiencia de los convertidores catalíticos para reducir los precursores del ozono.

El interés por estudiar los problemas de contaminación atmosférica ha llevado a realizar esta revisión para poder aportar un trabajo en el cual se logre entender mejor el problema de contaminación por ozono conjugando los puntos de vista biológico y físico.

La sociedad necesita saber los niveles de contaminación, entenderlos y saber cómo puede contribuir a reducir estos niveles o a protegerse de los efectos de la misma.

Para realizar esta tesis se utiliza la bibliografía más reciente y revistas especializadas en temas de contaminación como: Pollution Abstracts, Revista-Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias. Journal of the Air and Waste Management Association, Environmental Science Technology, Journal of Catalysis, etc., haciendo comparaciones entre los resultados de varios artículos y analizándolos para sacar conclusiones.

A la par de la revisión bibliográfica se llevan a cabo experimentos en el laboratorio con relación a los convertidores catalíticos y la reducción de precursores de ozono. Se realiza todo esto con la supervisión de los directores de tesis.

En el capítulo 1 se hace una distinción entre el ozono estratosférico y el troposférico y se exponen los efectos a diferentes concentraciones de este último en la salud de los seres vivos y se comparan con los niveles ambientales alcanzados en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). En el capítulo 2 se identifican las fuentes emisoras de precursores del ozono, sus factores de emisión y se analizan las características que favorecen la contaminación en la ZMCM, además se estudia el sistema de monitoreo de contaminantes atmosféricos y el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA). En el tercer capítulo se estudian los convertidores catalíticos como un dispositivo anticontaminante y finalmente se describen algunos de los experimentos en los que se colaboró para la caracterización de un nuevo tipo de catalizadores de rutenio.

Esta investigación es de utilidad para saber las condiciones en que se encuentra el problema de contaminación por ozono en la ZMCM. Y por supuesto, aporta propuestas para la reducción del ozono de la atmósfera de la Ciudad de México.

Existen fenómenos atmosféricos como: el calentamiento global (32) debido al efecto de invernadero de algunos gases que absorben radiación infrarroja como metano, óxidos de nitrógeno, clorofluorocarbonos y dióxido de carbono; la disminución de la capa de ozono, cuya función es proteger a los seres vivos de los rayos ultravioleta del sol, por el incremento de compuestos fluorocarbonados (19, 44), y lluvia ácida producida por óxidos de nitrógeno y azufre, que acaba con la vida de plantas y animales.

En años recientes, la contaminación del aire ha llegado a convertirse en un problema serio. Diversos casos de contaminación atmosférica extrema donde murieron y enfermaron cientos de personas se han dado en todo el mundo, algunos ejemplos son:

Fecha	Ciudad
1873	Londres, Inglaterra
1930	Valle de Meuse, Bélgica
1931	Manchester y Salford, Inglaterra
1948	Donora, Pennsylvania
1952 y 1956	Londres, Inglaterra
1963	Yokkaichi, Japón
1972	Suecia
Última década	Varias ciudades

Se han realizado acciones, a nivel mundial, para combatir y prevenir la contaminación. En 1972 las Naciones Unidas establecieron, en Estocolmo, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y desde 1975 estableció éste un Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente así como la Oficina para la Industria y el Medio Ambiente (6); en 1977 se redactó el Plan de Acción Mundial para la Capa de Ozono con apoyo del PNUMA. En 1979 se llevó a cabo la Conferencia sobre el Clima Mundial patrocinado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Consejo Internacional de Uniones Científicas.

En 1984 el PNUMA y la Cámara de Comercio Internacional (CCI) convocaron en Versalles a la primera Conferencia Mundial de la Industria sobre la Ordenación del Medio Ambiente. En marzo de 1985

la Comunidad Económica Europea y otros 21 países firmaron en Viena un Convenio Mundial para la Protección de la Capa de Ozono. En Villach, Austria, se llevó al cabo, en octubre de 1985 una Evaluación Internacional del Cambio Climático. Y en mayo de 1986, la CCI abrió una Oficina Internacional para el Medio Ambiente en Ginebra. El Protocolo de Montreal de 1987, fue una reunión en la que más de 50 naciones acordaron reducir el uso de clorofluorocarbonos (CFC) para proteger la capa de ozono. Apoyados por el PNUMA se reunió en Ginebra en 1988 un Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos para formular estrategias que hagan frente a los cambios climáticos. En 1988, en Australia, el Programa Internacional Geósfera-Biósfera (IGBP) apoyó el proyecto de Química Atmosférica Global Internacional (IGAC). En abril de 1993 se realizó la primera Conferencia Científica del IGAC en Eilat, Israel. En 1995, se firmó un acuerdo de cooperación entre la autoridad ambiental en México y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) para apoyar la gestión ambiental en México.

Estas acciones se han tomado para unir a las naciones a enfrentar el problema ambiental.

La ZMCM es una de las metrópolis más pobladas del mundo, donde los problemas de contaminación se consideran importantes para su desarrollo. Este problema se hace más difícil por las condiciones geográficas, climáticas y meteorológicas que se dan especialmente en esta área, y se convierte en un problema multidisciplinario que compete a Universidades e Instituciones de Investigación. Debido a que existen pocas investigaciones sobre el problema de contaminación atmosférica en esta zona, debería darse mayor apoyo a estos estudios y enfocarlos a los efectos sobre la salud, daños a la vegetación, fuentes emisoras de contaminantes y estudios experimentales para la reducción en la atmósfera. Principalmente en el extranjero se cuenta con una gran cantidad de información científica acerca del ozono troposférico y su comportamiento como contaminante, sin embargo, esta información se encuentra dispersa y en condiciones que hacen difícil la comparación de los resultados.

Desde 1986 las concentraciones/ hora de ozono han aumentado. Los niveles de 1992 son 45% mayores que en 1986.

El interés por estudiar el problema de la contaminación por ozono en la ZMCM radica en que es el ozono el contaminante que con mayor frecuencia sobrepasa las normas de seguridad establecidas.

Objetivos

Se trazan objetivos para lograr una tesis bibliográfica de utilidad en trabajos acerca de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México, y sobre todo que sirva para tomar medidas que logren disminuir el ozono en esta ciudad.

Se realiza una revisión bibliográfica sobre el ozono, enfocada en:

- 1) Efectos en la salud y la vegetación
- 2) Las fuentes contaminantes de los precursores del ozono y
- 3) Las medidas de control en la ZMCM

Metodología

La realización de este trabajo se basa, principalmente, en la búsqueda de bibliografía de los últimos diez años e incluye la consulta de las siguientes fuentes: Ciencia y Desarrollo, Calidad Ambiental, Revista-Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias, Contaminación Ambiental, Ciencia, Journal of the Air and Waste Management Association, Environmental Science Technology, Journal of Catalysis, New Phytol, etc., haciendo comparaciones de los resultados de varios artículos y analizándolos para sacar conclusiones.

A la par de la revisión bibliográfica se llevan a cabo experimentos en el laboratorio con relación a los convertidores catalíticos y la reducción de precursores de ozono.

1.1 Ozono: definición.

En 1840, el químico alemán, Christian F. Schönbein aisló este gas, dándole el nombre de ozono (del vocablo griego que significa “oler”). El ozono es un gas de color azulado formado molecularmente por tres átomos de oxígeno (O_3). Su olor es picante, es más pesado y mucho más soluble en agua que el oxígeno diatómico, y químicamente, más activo (17).

Se encuentra en forma natural en la estratósfera donde puede alcanzar concentraciones de hasta 12 ppm ($23,520 \mu\text{m}/\text{m}^3$) éste es producido por irradiación solar del oxígeno molecular (45) y actúa como una barrera contra la radiación ultravioleta del sol siendo esta protección imprescindible para los ecosistemas.

En la tropósfera, su origen es antropogénico porque se forma a partir de los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos emitidos durante la combustión en motores (de combustión interna) y calderas como consecuencia de las actividades humanas.

Como se muestra en la fig. 1 las concentraciones y presión parcial de ozono varían con la altitud. El pico de presión parcial que se observa entre 20-30 Km. previene que gran parte de la radiación solar, en el rango de longitud de onda 200-300 nm, alcance la superficie terrestre. La relación de mezcla se define como las moléculas de ozono/moléculas de aire; debido a que la atmósfera disminuye exponencialmente con la altitud, el pico de la relación de mezcla del ozono se da a una mayor altura que la presión parcial de ozono.

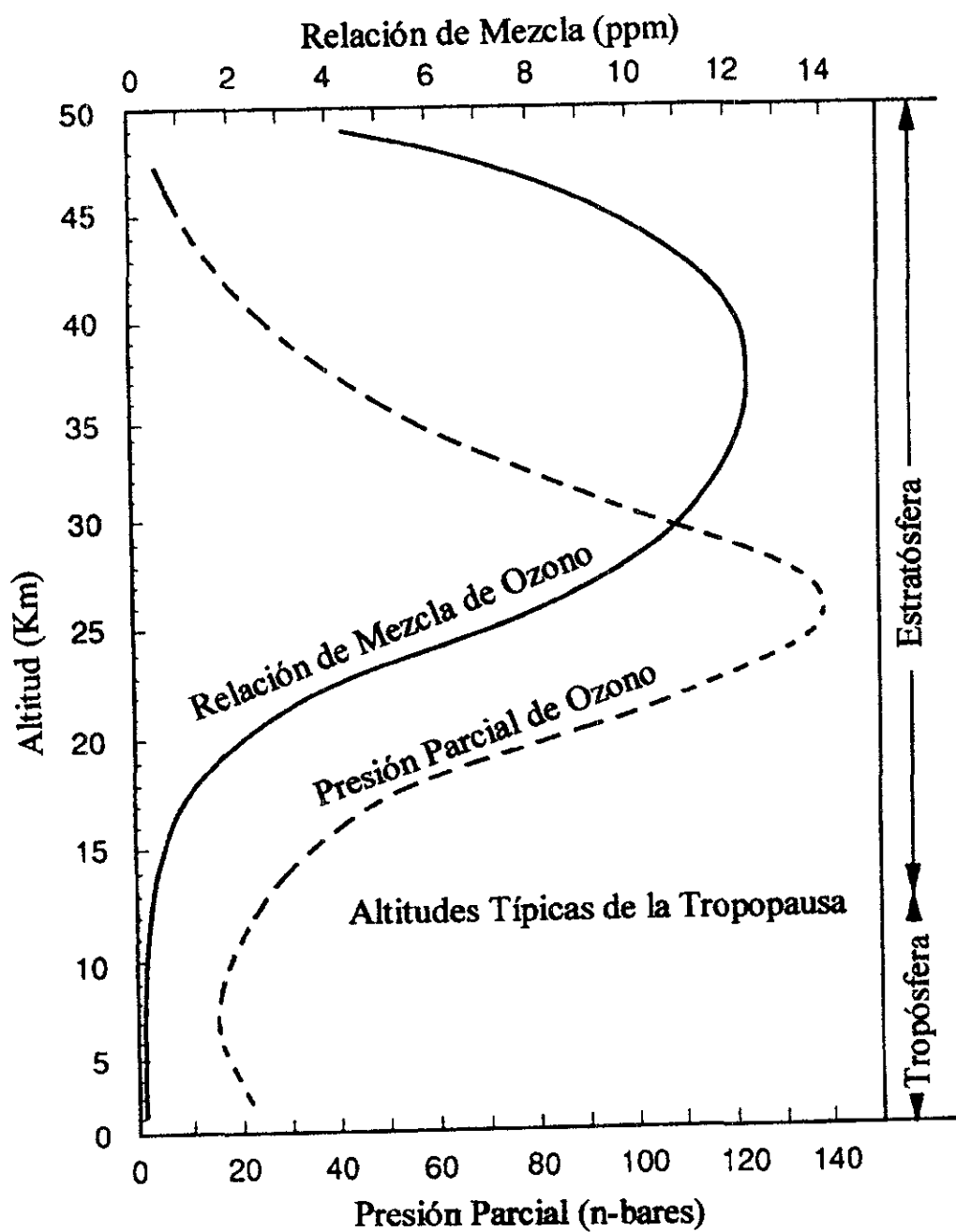


Fig. 1 Promedio anual global de la distribución vertical de ozono

1.2 Ozono estratosférico.

La mayor concentración de ozono se encuentra entre los 20-30 km de altitud y es ahí donde cumple la función de absorber la radiación ultravioleta y así proteger a los organismos vivos de los efectos nocivos de esta radiación.

Una parte de la energía emitida por el sol es radiación ultravioleta. La radiación ultravioleta (UV) se clasifica en 3 tipos según su longitud de onda:

- UV A (320-400 nm)
- UV B (290-320 nm)
- UV C (< 290 nm)

Arriba de los 24 Km. el ozono es creado y destruido por la radiación ultravioleta proveniente del sol.

Cuando los rayos ultravioleta de alta energía llegan a las moléculas de oxígeno común (O_2), rompen la molécula en dos átomos sencillos de oxígeno, conocido como oxígeno atómico. Entonces, un átomo de oxígeno puede chocar con una molécula de oxígeno (O_2), y formar una molécula de ozono (O_3).

La luz solar incide sobre la molécula de ozono (absorbe 200-320 nm) rompiéndola, y esto libera energía, el resultado es $O_3 + hv \rightarrow O_2 + O$; y ambos productos están electrónicamente excitados (71). Es así como el ozono estratosférico actúa como un escudo alrededor de la tierra que prácticamente elimina la radiación UV C y reduce en gran medida la cantidad de radiación UV B que alcanza la superficie del planeta. Sin el efecto protector del ozono, los ecosistemas terrestres no podrían haber evolucionado como lo hicieron (6).

Existen productos químicos artificiales como los clorofluorocarburos (CFC) (que se manufacturan para los refrigeradores y aires acondicionados) o freones y los halones. Tanto los freones como los halones son productos muy estables, que persisten entre 75 y 110 años en la atmósfera, sin descomponerse. Finalmente se desintegran en la estratósfera por la radiación severa liberando halógenos, cloro en el caso de los freones y bromo en el caso de los halones. Tanto el cloro como el bromo destruyen el ozono sin consumirse en el proceso, es decir actúan como catalizadores. Una molécula de cloro o bromo puede destruir así un millón de moléculas de ozono. La capacidad de un producto químico para destruir ozono depende del tipo (cloro o bromo) y el número de átomos de halógeno que libera al desintegrarse, y de su período de permanencia en la atmósfera (32).

Por ejemplo, sobre Toronto, la capa de ozono se ha adelgazado entre 4-5% desde 1980. La más severa pérdida, es en la Antártida, donde ha habido un 50% de decremento en los niveles de ozono desde mediados de los años 70's.

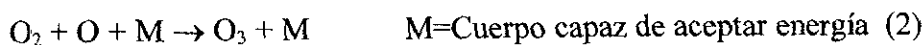
El agotamiento del ozono estratosférico tiene dos importantes consecuencias ambientales:

1) la capa de ozono absorbe la mayoría de la radiación ultravioleta-B del sol (UV B) la que de otro modo alcanzaría la tierra y dañaría severamente la vida de las plantas y los animales. El agotamiento de esta capa traería como consecuencia mayores incrementos en los casos de cáncer de piel, reducción en las cosechas y decremento en el crecimiento de algas y fitoplancton, que son la base de la cadena alimenticia en los ecosistemas acuáticos.

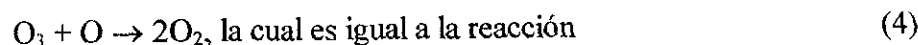
2) el ozono juega un papel a nivel mundial en la regulación del flujo de calor a través de la atmósfera al absorber la radiación solar, por lo que la distribución de ozono en la estratósfera afecta la temperatura de la atmósfera y los patrones del clima. Aún cambios pequeños en las entradas de energía del sol a la atmósfera y el intercambio de energía por radiación entre la tierra y la atmósfera pueden influir nuestro clima.

La formación de ozono estratosférico involucra una serie de reacciones químicas, a continuación se hablará de los modelos propuestos:

El simple modelo de Chapman:



fue complementada por procesos catalíticos destructores de ozono, principalmente producidos por los grupos radicales HOx, NOx y ClOx por ejemplo:



Cada ciclo acelera la reacción (4).

Los radicales son producidos a partir de gases que son moléculas estables como H₂O, N₂O, CFC, CH₃Cl, CH₄ y otras, por reacciones con átomos de oxígeno electrónicamente excitado O (1D) que son un producto de la reacción 3, si $\lambda \leq 310 \text{ nm}$, por reacciones con el radical OH• o a través de la fotodisociación

por radiación UV, la mayoría de la misma longitud de onda que produce el ozono vía la reacción 1 ($\lambda \approx 210 \text{ nm}$).

Ejemplo:



Seguido por el rápido decaimiento del radical $\text{CH}_2\text{Cl}\bullet$, produciendo un átomo libre de cloro.



También seguido por mayor desintegración del radical $\text{CFCl}_2\bullet$, produciendo mas átomos de cloro. Estas reacciones ocurren predominantemente en la estratósfera, algunas de ellas como las reacciones 7 y 8 ocurren en la tropósfera.

La producción de radicales de los gases es, con la excepción del grupo HOx, irreversible (21). Sin embargo, los radicales son transferidos, la mayoría por reacciones entre ellos mismos, en moléculas reactivas como HNO_3 , HCl , ClNO_3 , pero que no destruyen el ozono; estos procesos son reversibles y conducen a un estado de equilibrio entre los radicales y las moléculas, que son llamadas especies reservorias. No hay mas reacciones que remuevan las especies reservorias ni los radicales de la estratósfera. y no se puede limpiar esta capa por los procesos de precipitación; por eso, el crecimiento ilimitado de concentraciones de radicales y de gases reservorios se previene solamente por el retorno de porciones de aire estratosférico a la tropósfera donde estas sustancias son lavadas.

1.3 Ozono Troposférico

Se encuentra en la tropósfera entre los 0-10 km. de altitud.

Es un oxidante fotoquímico o contaminante secundario porque es formado en el “smog” (del inglés que significa humo más bruma) por reacciones entre hidrocarburos y óxidos de nitrógeno (contaminantes primarios que son sus precursores) y por la acción de la radiación solar.

Se produce de la disociación de la molécula de oxígeno (con una energía de 50kJ/g.mol) proporcionada por la radiación solar (68). El ozono se forma cuando un átomo de oxígeno (O), producido en la tropósfera por la fotodisociación solar del dióxido de nitrógeno (NO₂), se combina con el oxígeno molecular para formar ozono (46). Un acontecimiento subsecuente es la conversión del ozono en oxígeno. Este libera energía, pero no como radiación ultravioleta, sino como energía calorífica (17).

Precusores del ozono:

Los óxidos de nitrógeno más característicos son: el NO y el NO₂ midiéndose generalmente su suma. Se producen en los procesos de combustión de casi todos los productos derivados del petróleo, donde se alcanzan temperaturas muy elevadas. Los focos emisores de NO y NO₂ son los escapes de los vehículos automotores, procesos de combustión en la industria siderúrgica, petroquímica, centrales termoeléctricas, etc.

Los hidrocarburos (C_nH_m) son compuestos como el metano y el acetileno, de los cuales los hidrocarburos no saturados son el grupo más peligroso, por su facilidad de reaccionar a la luz solar, originando el conocido “smog” fotoquímico.

Los hidrocarburos son producto de la combustión incompleta de la gasolina y el combustible diesel en los vehículos automotores (sobre todo aquellos que tienen el sistema de carburación o inyección de combustible del motor mal afinado o en general muy desgastado), se volatilizan en los expendios de gasolina, así como en todas las actividades que emplean solventes orgánicos: pintura, limpieza, etc.

A concentraciones elevadas el ozono troposférico tiene efectos nocivos sobre la salud humana (la OMS recomienda un período máximo de 8 horas en aire que contenga 0.12 mg/m³). El ozono troposférico reduce las cosechas de ciertos cultivos y daña los bosques. También contribuye en gran medida al efecto invernadero, de manera que es un factor importante en el problema del calentamiento atmosférico (6).

Procesos de formación del ozono.

La formación de ozono troposférico involucra las siguientes reacciones:



Los hidrocarburos están representados como RH, los radicales hidroxilo como OH• y los radicales orgánicos como R•.

Los radicales orgánicos se combinan con oxígeno molecular para formar radicales peroxi (RO₂), un proceso que generalmente requiere un tercer cuerpo inerte, M (por ejemplo O₂ o N₂).



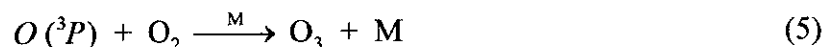
Los radicales peroxi reaccionan con óxido nítrico (NO) para formar dióxido de nitrógeno (NO₂).



El dióxido de nitrógeno es fotodisociado por la radiación solar para liberar átomos de oxígeno en estado base, O (³P), y volver a formar óxido nítrico:



La energía de la radiación solar es representada por hν, el producto de la constante de Planck's, h, y la frecuencia, ν, de las ondas electromagnéticas de radiación solar. Finalmente, los átomos de oxígeno se combinan con oxígeno molecular, en presencia de un tercer cuerpo, para formar ozono:



Este proceso es una reacción en cadena: el ozono es fotodisociado por la radiación solar del ultravioleta cercano para formar un átomo de oxígeno excitado, O (¹D):



el cual puede reaccionar con vapor de agua (H₂O) para formar dos radicales OH:



Los radicales OH• resultantes guían el proceso en cadena. Además, las reacciones iniciadas por los radicales RO• formados en la reacción 3 pueden, en presencia de NO, llevar también a la producción de OH•. Con suficientes hidrocarburos y NO_x en la atmósfera, las reacciones en cadena representadas arriba pueden, en presencia de luz solar, conducir a concentraciones de ozono troposférico que sean dañinas para la salud (46) (Fig. 2).

Los hidrocarburos presentes en la atmósfera se combinan en muchas reacciones distintas con el NO, inhibiendo la reacción inversa y permitiendo el aumento del ozono. Por eso se dice que los NO_x e hidrocarburos son los precursores de la formación de ozono (53).

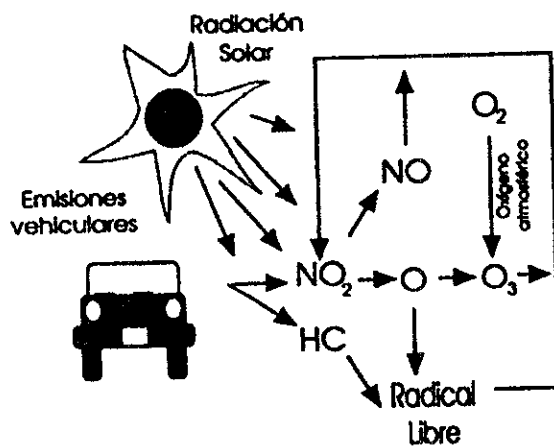


Fig. 2 Representación esquemática de la formación de ozono

Tipos de “smog”

Existe “smog” reductor asociado con la contaminación en Londres, y “smog” oxidante asociado con Los Angeles, éste último se caracteriza por altas concentraciones de ozono y de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos reactivos (NMHC) principalmente, bajos niveles de humedad y temperaturas altas; a este último tipo de contaminación del aire se le llama “smog” fotoquímico. La contaminación atmosférica que se presenta en el Valle de México es de éste tipo. El “smog” reductor lo caracterizan las altas concentraciones de óxido de azufre y de partículas, altos niveles de humedad y temperaturas bajas, tales como las que ocurren en las grandes zonas urbanas del norte de los E.U. y de Europa Occidental donde la combustión de carbón y de combustible es la principal fuente de contaminantes primarios (71).

El ozono tiene aplicaciones como: desinfectante para el aire y agua, en blanqueadores, ceras, textiles, aceites y síntesis inorgánicas (7).

En los interiores se genera directamente ozono a partir de aparatos que trabajan con luz ultravioleta o altos voltajes, como copadoras, arcos eléctricos o precipitadores electrostáticos, y es necesario que las personas que laboran en estos ambientes eviten la exposición a este contaminantes (53).

No obstante que las reacciones fotoquímicas cesan en la obscuridad, otro tipo de reacciones se suceden en la noche. A la mañana siguiente, el ozono y otras moléculas reactivas están presentes en el aire para reanudar la reacción fotoquímica. El “smog” de ozono puede viajar cientos de kilómetros, durar varios días y fortalecerse al pasar por una fuente de contaminación.

Medición:

Los analizadores quimioluminiscentes se emplean para medir las cantidades de los óxidos de nitrógeno u oxidantes, medidos como ozono. Cuando el NO reacciona con el ozono, se produce una cierta cantidad de especies excitadas de NO₂, las que luego pasan al estado básico por la emisión de energía de radiación. La energía radiante es medida por un tubo fotomultiplicador cuya salida eléctrica es amplificada y alimentada a dispositivos adecuados de lectura directa. Las reacciones químicas son:



Alrededor del 5 al 10 % de la cantidad total de NO₂ es producida por la segunda reacción.

Luego

El tubo fotomultiplicador recibe la radiación $h\nu$. La intensidad de la radiación es proporcional a la cantidad original de NO que esta presente en la muestra de gas.

Cuando el NO₂, así como el NO, esta presente en la muestra de gas, este se hace pasar por un tubo caliente de acero inoxidable para convertirlo en NO, antes de introducirlo en la cámara de reacción quimioluminiscente. La reacción química es:

Por tanto, cuando la muestra de gas contiene tanto NO como NO₂, es necesario un proceso de dos etapas. Se hace pasar primero el gas por el convertidor de acero inoxidable y luego se hace reaccionar con el ozono en la cámara quimioluminiscente a fin de obtener el valor de NO. La cantidad de NO₂ en la muestra de gas se determina luego por diferencia.

También se produce quimioluminiscencia cuando se permite que el ozono reaccione sobre una superficie (un colorante orgánico sobre sílica gel). La emisión resultante se detecta por un fototubo, y la corriente generada está directamente relacionada con la masa de ozono por unidad de tiempo que fluye sobre la superficie.

La quimioluminiscencia constituye el principal método para monitorear los oxidantes fotoquímicos en la atmósfera, a pesar de que algunos instrumentos comerciales se basan en principios colorimétricos o coulombimétricos. Las mediciones de oxidantes deberán corregirse para la presencia de NO₂ y SO₂ y los valores que resulten constituyen primero una indicación de la concentración de ozono. Una técnica conveniente para el control continuo del ozono en el aire, se basa en la quimioluminiscencia que resulta de la reacción entre el ozono y el etileno a presión atmosférica. Es posible controlar ya sea el ozono o el

monóxido de nitrógeno atmosférico por medio de una reacción quimioluminiscente a baja presión entre el monóxido de nitrógeno y el ozono. Esta última técnica ha sido ampliada para incluir la medición de los óxidos totales de nitrógeno así como el NO_x junto con el amoníaco (68).

El gobierno ha dictado normas para el ozono. A partir de 1991 se han tratado de controlar las emisiones de NO_x e hidrocarburos del transporte a través de la introducción del convertidor catalítico de 3 vías en los automóviles y la conversión de diesel a gas del transporte de carga y microbuses con uso obligatorio del convertidor de 3 vías.

1.3.1.Efectos del ozono en la vegetación.

La vegetación es una parte importante de cualquier ecosistema.

El ozono siendo un oxidante fotoquímico es un compuesto fitotóxico. Según Heck, *et al* (35) el ozono afecta la vegetación en los EUA, dañando las cosechas, la vegetación nativa y los ecosistemas más que cualquier otro contaminante atmosférico.

La incidencia y magnitud de los efectos depende de la concentración del contaminante, duración de la exposición, tiempo entre las exposiciones, genotipo, edad, estado fisiológico de crecimiento, condiciones ambientales, el suelo y las condiciones nutricionales influyen la respuesta de las plantas (66, 67). Algunos de estos factores influyen más que otros, por ejemplo, son más dañinas las exposiciones de alta concentración y cortas de duración que las exposiciones de baja concentración pero largas de duración (46).

Los efectos ocurren en la vegetación cuando la cantidad de contaminante absorbido excede la habilidad de la planta de desintoxicar el ozono o reparar el impacto inicial (66).

Los daños a las plantas causados por la contaminación del aire, ocurren por lo general en la estructura de la hoja, ya que ésta contiene los mecanismos de construcción de toda la planta (68) y la entrada de contaminantes gaseosos es más directa a través de los estomas abiertos sobre el envés de las hojas de las plantas. Los estomas son activos en el intercambio de gases (oxígeno, vapor de agua y dióxido de carbono) con la atmósfera circundante (64).

Para entender mejor el mecanismo de toxicidad del ozono se describe brevemente la anatomía de una hoja de una planta.

Una hoja se puede dividir en tres regiones: La epidermis forma una capa protectora en el exterior, el mesófilo es la sección central de la hoja, y contiene dos capas, denominadas la empalizada y el parénquima esponjoso. Además, una densa red de venas atraviesa toda la hoja desde su base o pedúnculo. Las venas suministran el sistema de transporte del agua y de otros productos químicos que se transfieren a otras partes de la planta. Son de especial interés en los estudios de contaminación del aire, las aberturas desde la epidermis hasta el mesófilo, llamados estomas, rodeados por células que los abren o cierran.

Los efectos fitotóxicos de la contaminación atmosférica en las plantas aparecen solamente cuando suficiente concentración del gas se difunde en el interior de la hoja y pasa a la fase líquida en las células. Para modificar o degradar la función celular, el ozono debe difundirse en la fase gaseosa que rodea a las hojas, atravesar los estomas (al ejercer algún control en la toma de ozono) y entrar en las células disolviéndose en el agua que cubre las paredes celulares (67), donde el ozono o sus productos de

descomposición reaccionan con los componentes celulares y afectan los procesos metabólicos. Esto sucede cuando la planta no puede desintoxicarse, metabolizar, reparar o compensar el impacto del ozono (22, 43, 66, 65).

Mecanismo de Toxicidad:

El ozono actúa primero a nivel bioquímico al ocurrir cambios en las actividades enzimáticas, función de la membrana y utilización de la energía (52). Diversas investigaciones han mostrado que la actividad de la enzima RuBP-carboxilasa es reducida por exposiciones de ozono ambiental (18, 23, 47). Se ha reportado daño a la membrana usando niveles agudos de ozono (34). La exposición crónica puede dar cambios en la composición lipídica y cambios en la resistencia al frío (8, 19, 40, 70).

La respuesta de las plantas a la exposición de ozono se manifiesta como: reducción tanto en la tasa neta de intercambio de CO₂ (por destrucción de la clorofila), como en la producción y distribución de carbohidratos, en el vigor, crecimiento y reproducción, además de medirse un incremento en la producción de etileno y daño foliar visible (42, 67). La alteración en la distribución de carbohidratos incrementa la susceptibilidad a las plagas de insectos y hongos patógenos e interfiere con la formación de micorrizas (31, 43).

Algunos trabajos realizados:

En geranios y claveles, el ozono disminuye la cantidad de ramificaciones laterales, así como el crecimiento y la floración. En 1959, las plantas de tabaco mostraron signos visibles (manchas) de daño por ozono.

Los bosques de pino, y en particular las especies de pino Ponderosa en el Bosque Nacional de San Bernardino al sur de California, están seriamente afectados por contaminación de ozono. También en Virginia, Hayes y Skelly (33), reportan daño a los pinos blancos por ozono.

Pinos Scots *Pinus sylvestris* L. jóvenes fueron expuestos a 0.1 y 0.15 ppm de ozono por 4 semanas. y a 0.3 ppm de ozono por 6 días en 3 experimentos por separado. Los resultados indican que el aumento en los niveles atmosféricos de ozono puede alterar los carbohidratos primarios y el metabolismo de los aminoácidos (36).

También hay ciertas pruebas de que las mezclas de ozono y dióxido de azufre pueden actuar en forma sinérgica -es decir, en conjunto- y lesionar a especies sensibles a concentraciones de 0.02 y 0.03 ppm de ozono junto con 0.02 y 0.01 ppm de dióxido de azufre, los cuales son niveles mucho menores que los umbrales para los contaminantes individuales (64).

Para resumir, los efectos fisiológicos del consumo de ozono se han manifestado de dos maneras: 1)reducción neta de fotosíntesis e 2)incremento en la senectud. Ambos dan como resultado la disminución en la capacidad de las plantas para formar carbohidratos, de ese modo afectan el crecimiento de la planta.

La información acerca de la sensibilidad de las plantas es muy útil. En primer lugar, las especies menos sensibles se pueden cultivar en regiones donde es probable que sean afectadas por contaminantes del aire, ya sea en plantíos al lado de la carretera o en parques de la ciudad. En segundo lugar, las especies muy sensibles, se pueden cultivar cerca de fuentes de contaminación del aire para monitorear la concentración utilizándolas como modelos, indicando si las medidas de control que se toman son efectivas.

Los resultados obtenidos en los experimentos de la NCLAN (National Crop Loss Assessment Network) indican que concentraciones promedio/hora mayores de 0.10 ppm pueden dar efectos adversos en la vegetación.

1.3.2. Efectos del ozono en la salud

Debido a que existen pocos estudios acerca de los efectos del ozono en la Ciudad de México, se toman como referencia algunos de los que se han realizado en el extranjero aunque no se apliquen enteramente a las condiciones de la ZMCM.

El daño que la contaminación atmosférica puede ocasionar a la salud depende de muchos factores entre los que se encuentran: concentración de los contaminantes, tiempo de la exposición, tasas de ventilación, lugar, hora del día, temperatura, clima y las características particulares de cada individuo que a su vez dependen de la especie, anatomía de las vías aéreas, estado de desarrollo, enfermedad preexistente, edad, estado hormonal y nutricional y sistemas celulares protectores (9,37).

Las evidencias más fuertes acerca del efecto del ozono provienen de los estudios experimentales en humanos expuestos al ozono, pero en algunas concentraciones elevadas es peligroso someterlos a experimentación, por lo cual se recurren a estudios con animales de laboratorio.

En 1990 se realizó un programa de investigación llamado Clean Air Act Amendments (CAAA) para cuantificar los daños de la exposición al ozono en enfermedades y mortalidades de las poblaciones. En México, existe un convenio de colaboración entre el Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER), el Programa Universitario de Investigación en Salud (PUIS) y la Facultad de Medicina (FM) de la UNAM, este estudio se efectuará en 2 niveles: el experimental, el cual consiste en un estudio con cobayos, y el clínico, que estudia sujetos asmáticos y normales. El proyecto permitirá evaluar el papel de la inflamación y la tolerancia durante la hiperreactividad de las vías aéreas, inducida por la exposición aguda y crónica al ozono, estudiar los mecanismos de transducción de señales intercelulares en el músculo liso de las vías aéreas y las modificaciones inducidas por la exposición al ozono. Así mismo, se formarán recursos humanos de alto nivel para la investigación biomédica.

El daño biológico por ozono depende de la incidencia de los contaminantes a los elementos sensibles en las células y tejidos, y es regulada por la constante de velocidad de su reacción con el gas (9).

El ozono es una molécula altamente reactiva con una elevada capacidad oxidante. Ataca una variedad de moléculas biológicas, particularmente aquellas con dobles enlaces carbono-carbono (como las encontradas en los lípidos de membrana). Se han propuesto varios mecanismos para explicar la toxicología del ozono. Los mecanismos factibles consideran que las membranas celulares son los sitios principales de toxicidad y sugieren que el daño que causa el ozono es inducido parcialmente por radicales libres (átomos que contienen un número impar de electrones y son sumamente reactivos porque tienen 7 electrones en su capa de valencia y buscan el electrón que les dará un octeto estable). Tales mecanismos son los siguientes:

Al entrar las moléculas de ozono al pulmón y chocar con las células del epitelio respiratorio, los lípidos no saturados se vuelven un blanco fácilmente accesible. Las reacciones del ozono con ácidos grasos no saturados conducen a la peroxidación lipídica (45). El ozono actúa al iniciar la peroxidación de los ácidos grasos poliinsaturados de las membranas celulares, los peróxidos y las especies secundarias reactivas de oxígeno consecuentes producen su toxicidad al dañar la integridad de la membrana celular y de otras moléculas celulares (9) y esto conduce a la subsecuente formación de radicales libres de lípidos, dienos conjugados en lípidos semiestables, epóxidos e hidroperóxidos, ozónidos y otros. Algunos de estos productos han sido detectados en el tejido pulmonar después de exposición a ozono *in vivo*. Los productos de peroxidación lipídica son citotóxicos, y pueden causar daño a otras biomoléculas, incluyendo proteínas y ácidos nucleicos (45).

El ozono ejerce su toxicidad al oxidar proteínas de membrana de bajo peso molecular o péptidos solubles que contienen grupos funcionales como tioles, aminas, aldehídos y alcoholes (9).

Dado que las membranas están constituidas tanto por proteínas como por lípidos, es difícil separar ambos mecanismos de tal manera que se considera a ambas teorías como complementarias y que la oxidación de ácidos grasos insaturados y proteínas ocurre simultáneamente (9).

La inducción del sistema de la peroxidasa de glutatión, consistente de la deshidrogenasa de glucosa-6-fosfato y la reductasa y peroxidasa de glutatión, es uno de los índices bioquímicos más sensibles a la exposición de ozono. Se han reportado aumentos en dicho sistema en ratas expuestas a 0.1 ppm de ozono durante 7 días. Y en monos expuestos a 0.2 ppm, 8 horas diarias durante 7 días.

Estos estudios apoyan la idea de que el ozono aumenta la peroxidación de los ácidos grasos insaturados, la cual a su vez activa al sistema de la peroxidasa de glutatión como un mecanismo protector (9).

En seguida se describirá el mecanismo de la respiración para entender mejor las consecuencias que tiene el ozono en el sistema respiratorio:

El aire se introduce en la nariz, donde el vello fino filtra la mayor parte de las partículas más grandes que miden alrededor de 10 μ de diámetro; el aire se calienta y humedece, y pasa a través de la tráquea, hacia el interior de los conductos bronquiales, los cuales subdividen la corriente de aire al introducirlo en los pulmones, donde hay una multiplicidad de sacos de aire (alvéolos pulmonares); en esta sección de] pulmón es donde el oxígeno (y los contaminantes del aire) se pueden absorber y transferir a la corriente sanguínea.

La región más afectada por la exposición a ozono es la unión entre las vías aéreas conductoras (tráquea, bronquios) y la región del intercambio gaseoso (alvéolos), esto independientemente de las

diferencias anatómicas inherentes a la mayoría de los animales de experimentación y a los humanos (9) (Fig. 3).

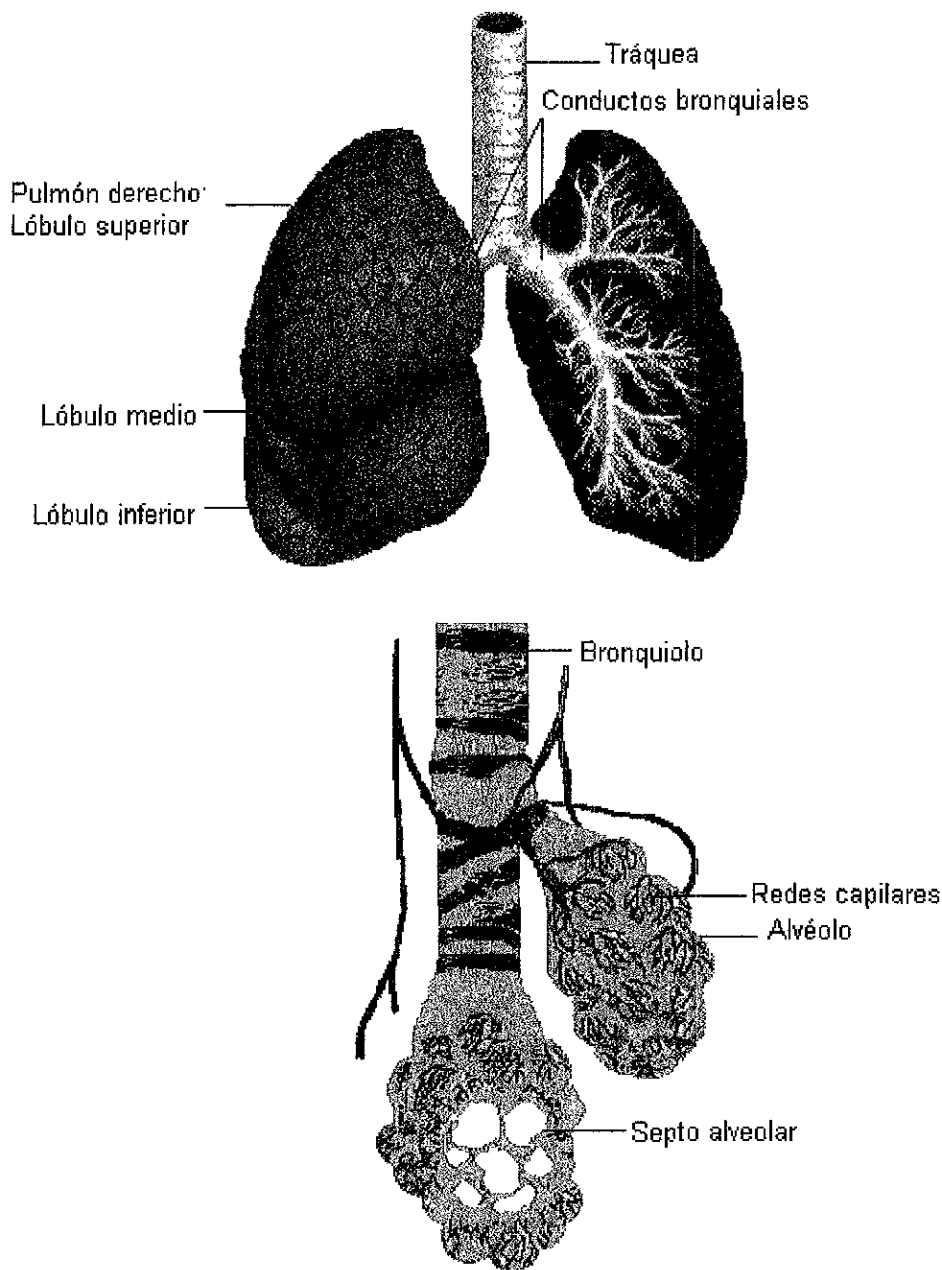


Fig. 3. Órganos de la respiración

1.3.2 1. Experimentos realizados con animales

En todas las especies animales estudiadas (ratas, cobayos, conejos, perros, monos) las concentraciones de 0.5 ppm de ozono producen en el aparato respiratorio alteraciones bioquímicas, morfológicas y funcionales irreversibles. Por tanto, es válido extrapolar el concepto de la elevada peligrosidad de esta concentración de exposición para el ser humano (13).

El ozono aumenta la permeabilidad del epitelio de las vías aéreas. Experimentos con perros, cobayos y humanos demuestran que la inhalación de ozono facilita la absorción de sustancias exógenas haciendo que se pierda la función de barrera física por parte del epitelio lo que permite que estas sustancias lleguen con mayor facilidad al músculo liso traqueobronquial (62).

Datos experimentales de animales muestran una disminución de la función respiratoria la cual es posible relacionarla con una mayor dosis de exposición, además la exposición prolongada al ozono lesiona preferentemente la región centroacinar del tracto respiratorio. Esto señala la necesidad de registrar los promedios de 6 u 8 horas de las concentraciones ambientales del ozono (13).

Estudios realizados en ratones sugieren que exposiciones perinatales de 0.2 ppm de ozono pueden reducir la sobrevivencia de la progenie (58).

Si el daño es suficientemente severo, la célula no se recuperará y morirá. En los pulmones de animales expuestos a ozono comúnmente se notifica necrosis (9).

En cobayos, gatos, conejos, humanos y perros, hay cambios en el patrón respiratorio inducidos por la exposición a ozono, desarrollan respiración rápida y superficial durante la exposición a concentraciones tan bajas como 0.26 ppm de ozono y duración de 2 horas. El inicio de este patrón anormal de respiración es rápido y el patrón respiratorio usualmente desaparece dentro de un lapso de 30 minutos al cesar la exposición. Se considera que estos efectos se deben a la estimulación de receptores sensoriales de las vías aéreas que, a través de un reflejo vagal producen broncoconstricción refleja (9).

Se dió tratamiento a embriones de hamster y a células de ratones C3H/10T-1/2 con 5 ppm de ozono por 5 minutos resultando en transformación celular. Ninguna transformación se observó en células no tratadas. Cuando las células fueron pretratadas con rayos gamma (3-4 Gy), y se expusieron a ozono dos horas después, las tasas de transformación fueron marcadamente incrementadas, indicando una interacción sinérgica entre los dos agentes. Experimentos indican que la preincubación de las células con vitamina E (succinato de tocoferol) inhibe la transformación celular por ozono y por radiación (7) ya que la vitamina E inhibe fácilmente, al actuar como antioxidante, la peroxidación de los ácidos grasos insaturados. Además la vitamina C actúa también como antioxidante pero en la fase acuosa (8). Investigaciones en macacos expuestos durante 8 horas diarias, durante 1 año, a concentraciones relativamente elevadas de ozono (3-4 ppm), han mostrado alteraciones estructurales en los bronquiolos terminales (48).

Se reportó el ozono como un acelerador de tumores pulmonares por la incidencia del incremento de tumores en ratones expuestos a 1 ppm (1,960 microgramos/m³) de ozono diariamente por 15 meses. En un segundo estudio, un grupo de 45 ratones fue expuesto a 0.50 ppm (980 microgramos/m³); otro grupo de 45 ratones respiraron aire limpio. El grupo experimental recibió ozono continuamente por 102 horas

durante la primera semana de cada mes por 6 meses consecutivos. Se sacrificaron los animales a los 10 meses de edad. La incidencia de tumores pulmonares espontáneos en el grupo de aire limpio fue 0.20 por ratón y esto comparado favorablemente con la incidencia esperada de tumores pulmonares para los ratones de su edad. El número de animales con uno o mas tumores por pulmón era mayor en el grupo expuesto al ozono, y la incidencia de tumores fue de 0.64 por ratón. La diferencia fue significativa ($p < 0.05$) (45) (Tabla I).

Tabla I. Desarrollo de adenomas pulmonares en ratones expuestos a ozono.

Grupo en tratamiento	Número de animales	Animales con tumores	Total de tumores pulmonares	Tumores por ratón
Aire limpio ^a	40	16	24	0.60
0.31 ppm ^a	40	21	34	0.85
Aire limpio ^b	45	8	9	0.20
0.5 ppm ^b	45	17	29	0.64

1.3.2.2. Experimentos realizados con humanos.

Existen pruebas funcionales respiratorias que nos dan una aproximación de los volúmenes y las capacidades pulmonares, que nos permiten apreciar los cambios originados por las diversas enfermedades pulmonares. Una de esas pruebas es el Volumen Expirado Forzado medido en tiempo (VEF_T), que es el volumen de gas que exhala forzosamente un individuo durante la maniobra de la Capacidad Vital Forzada o CVF (volumen de gas que se puede exhalar lo más rápido y forzosamente que sea posible después de haber inspirado al máximo), el cual se mide a diversos intervalos específicos, como a 0.5, 0.75, 1, 2, 3 segundos ($VEF_{0.5}$, $VEF_{0.75}$, VEF_1 , VEF_2 , VEF_3 respectivamente). Lo que mide esta maniobra es el volumen de gas exhalado en diferentes intervalos, por lo que en realidad lo que se está midiendo es el flujo respiratorio pulmonar.

Se ha encontrado que la función respiratoria de los niños que realizan actividades físicas al aire libre disminuye de manera reversible para concentraciones ambientales de ozono entre 0.12 y 0.20 ppm. Esto

^a La exposición fue de 103 horas por semana, cada quince días, por seis meses consecutivos; los animales fueron sacrificados a los 12 meses de edad; la diferencia no fue significativa.

^b La exposición fue de 102 horas por semana, cada primer semana del mes, por seis meses consecutivos; los animales fueron sacrificados a los 10 meses de edad; la diferencia fue significativa $p < 0.05$.

significa que después de que cesa la exposición, la función respiratoria regresa a su valor inicial normal. Se ha mostrado que la media de la función respiratoria VEF_1 , disminuye después de la exposición ambiental a concentraciones de 0.12 a 0.16 ppm de ozono/hora en niños, jóvenes y adultos jóvenes que estén realizando ejercicio intenso; entre un 2 y un 14% de los adultos que se exponen a estas condiciones experimentan una disminución en esa función mayor a un 10%. Debido al alto porcentaje de la población que puede presentar esta respuesta, este nivel de 0.12 ppm/hora se considera como el nivel más bajo al que se pueden observar efectos funcionales, que no es necesariamente el nivel más bajo al cual se presentan efectos "adversos" (13). Un efecto "adverso" se define como todo aquel que provoque una alteración funcional o un cambio patológico o ambos, y que puede afectar el funcionamiento normal del organismo, o contribuir a reducir la capacidad del organismo para responder a un reto adicional.

Los valores que hemos visto hasta ahora sobrepasan el nivel de IMECA 100, el cual reconoce que valores superiores a 0.11 ppm no deberían presentarse más que en una sola vez al año y con duración menor a una hora.

La constancia en el sitio de la lesión, y la intensidad de la misma, nos alertan ante la posibilidad de que este fenómeno se pueda presentar a largo plazo en el humano expuesto durante varios años a concentraciones altas de ozono ambiental aunque no existen evidencias epidemiológicas que lo fundamenten; sin embargo, estudios experimentales en humanos expuestos más de 6 horas a concentraciones de ozono cercanas a 0.1 ppm, muestran en los lavados broncoalveolares correspondientes, un aumento en las células y mediadores relacionados con una respuesta inflamatoria intensa (13).

Una concentración de 0.3 ppm después de 30 minutos, provoca tos e irritaciones en el aparato respiratorio; de 0.2 ppm durante tres horas, reduce la agudeza visual, aumenta la visión periférica, disminuye la nocturna y altera el balance de los músculos que controlan la posición ocular. Cuando son niveles de 0.03 ppm, en un período de 8 horas, producen en cualquier persona irritación nasal y de garganta; en fumadores, dificultad para respirar y pérdida de la energía. También se ha demostrado que a 0.05 ppm provoca una disminución en el volumen de la expiración forzada; de 0.03 a 0.3 ppm promedio en una hora, reduce la condición física de los atletas. El ozono, con niveles de 1.5 a 2.0 ppm, luego de dos horas puede ocasionar reacciones temporales respiratorias y reducir la capacidad mental (13).

La irritación producida por el ozono se manifiesta clínicamente, como inflamación de las conjuntivas, de la mucosa nasal y faríngea, y ocasionalmente de la piel. Por lo tanto, hay hiperemia (congestión sanguínea en un órgano) y ardor conjuntival, tos, obstrucción nasal y rinorrea (flujo abundante de secreción nasal a consecuencia de la inflamación de la mucosa). Estas respuestas dependen en mucho de la sensibilidad individual y es frecuente que personas poco sensibles no manifiesten ninguna molestia a

pesar de que respiren concentraciones de 0.34 ppm durante más de 1 hora (300 puntos de la escala IMECA).

Se observa a 0.12 ppm un decremento del 10% en VEF_1 y era acumulativo el efecto al transcurrir 3 horas en el experimento. Un tiempo promedio apropiado para los decrementos funcionales transitorios causados por ozono es mayor o igual a 6 h. Por esto hay menos bases científicas para el límite de exposición actual basado en la salud con un tiempo promedio de 1 h del que antes se creía.

Primero se da la limpieza de las partículas depositadas y después cambios en la función pulmonar (37).

Respuestas funcionales al ozono se incrementan con los niveles de actividad física y ventilación (37).

El ozono puede penetrar hasta las cavidades alveolares y provocar edema pulmonar que impide el intercambio de gases con la sangre (58).

A 0.08 ppm de ozono se produce inflamación y daños en la región alveolar del pulmón (58). Esta inflamación da como resultado un reclutamiento de macrófagos alveolares, linfocitos, y leucocitos polimorfonucleares a los sitios dañados. Bajo condiciones inflamatorias estas células liberan radicales libres, como O_2 y $HO\bullet$, que pueden causar posterior daño al tejido, incluyendo daño al DNA.

Además, las alteraciones cromosómicas están asociadas con la toxicidad pulmonar del ozono. Sin embargo, no se conoce si las alteraciones cromosómicas son por ataque directo del ozono a los cromosomas y/o por radicales libres generados por ozono, o por estrés metabólico no específico inducido por la toxicidad del ozono en la célula, lo que afecta indirectamente el material genético. Se ha observado un incremento en la frecuencia de intercambio de cromátidas hermanas (técnica citogenética que muestra aberraciones cromosómicas en estudios de mutagenicidad) después de exposición a ozono. Los aniones superóxidos incrementan el intercambio de cromátidas hermanas, aunque otros radicales libres como $HO\bullet$ y de lípidos, y los productos de la peroxidación generados por interacción del ozono con lípidos no saturados (tanto afuera como dentro del núcleo) tienen el potencial para dañar los cromosomas y para inducir el intercambio de cromátidas hermanas.

Hay evidencia de que el mecanismo de transferencia de electrones o de radicales libres juega un papel importante en la carcinogénesis. El ozono tiene las propiedades químicas necesarias para causar alteraciones bioquímicas y morfológicas en el pulmón, y conducir a los procesos de carcinogénesis (45).

En cualquier individuo la gravedad de los efectos pulmonares se agudizará a concentraciones de 0.6 ppm (13).

El ejercicio pesado no es recomendado en los episodios de altas concentraciones de ozono (0.15 ppm). Se han realizado experimentos al aire libre en Los Angeles (para observar la relación del ozono con otros contaminantes como las partículas suspendidas totales, el SO_2 , el CO y el NO_2), donde ciclistas

realizaron ejercicio pesado continuo durante 1 hora y no se observó evidencia de un efecto aumentado por otros contaminantes (1).

1.3.2.3.Inducción de Hiperreactividad.

Varios estudios indican que el ozono induce hiperreactividad de las vías aéreas. El ozono incrementa las respuestas a numerosos estímulos broncoconstrictores en mamíferos al dañar el tejido epitelial en tráquea, bronquios, bronquiolos, conductos alveolares y alvéolos (9).

Se conoce como hiperreactividad de las vías aéreas a la presencia de una respuesta broncoconstrictora exagerada del músculo liso ante una gran variedad de estímulos tanto específicos (alergénicos) como inespecíficos (histamina, metacolina, aire frío, ejercicio, ozono, etc.). Esta hiperreactividad es la característica mas sobresaliente del asma bronquial (62).

Los mecanismos a través de los cuales el ozono provoca este incremento en la respuesta de contracción del músculo liso traqueobronquial aún son inciertos. Se ha descrito que el epitelio de las vías aéreas juega un papel importante en la modulación de la respuesta contráctil del músculo liso traqueobronquial a diversos agonistas constrictores, probablemente, mediante la liberación de un factor relajador derivado del epitelio (FRDE). Existen diversos estímulos que desencadenan la liberación de este factor relajador, como son los agentes farmacológicos y sustancias endógenas como histamina, serotonina, acetilcolina, carbacol, metacolina, factor activador de plaquetas, leucotrienos y sustancia P, los cuales estimulan a las células epiteliales, probablemente, a través de receptores específicos (62).

Con base en la existencia del FRDE, una de las hipótesis más mencionadas sobre el mecanismo de acción del ozono para provocar hiperreactividad en las vías aéreas, es la de que al ser inhalado este gas produce lesión del epitelio respiratorio y con ello la subsecuente incapacidad del epitelio para producir este factor provocando un incremento en la respuesta del músculo liso traqueobronquial (62). Se sugiere que un proceso inflamatorio podría ser el principal mecanismo involucrado en la hiperreactividad de las vías aéreas periféricas inducida por el ozono en cobayos normales y sensibilizados (62).

El ozono provoca hiperreactividad a la histamina en las vías aéreas periféricas, mas no en las centrales, sugiriendo que existen diferencias regionales en cuanto a la respuesta de las vías aéreas a la exposición al ozono. Dicha hiperreactividad no se vió incrementada al sensibilizar previamente a los cobayos contra la ovoalbúmina, es decir, hacerlos asmáticos. El ozono no induce daño funcional importante del epitelio traqueal, al menos, al ser evaluado en su capacidad para producir FRDE (62).

En personas asmáticas los ataques aumentan durante los días en que son superiores a 0.13 ppm. Enfermos de este mal o de enfisema expuestos a una concentración de 0.1 a 0.15 ppm, aumentan la resistencia de entrada de aire y disminuye tanto el consumo como la cantidad de oxígeno arterial (13).

1.3.2.4. Adaptabilidad.

Hay evidencias de que el ozono reduce la sensibilidad celular y en algunos casos aumenta el espesor del moco, factores que podrían modificar la toxicidad del ozono (9).

Diversos estudios apoyan la respuesta adaptativa en humanos normales (9). En condiciones experimentales al cuarto o quinto día de exposición el decremento en el funcionamiento respiratorio o es muy pequeño o se nulifica, y esta disminución en la respuesta persiste durante 4 ó 7 días. Esta adaptación se presenta para exposiciones del orden de 0.7 ppm de ozono/dos horas, y no se observa en las exposiciones menores o iguales a 0.2 ppm (13).

También se ha señalado que las personas muy sensibles al ozono requieren un tiempo más largo para adaptarse a la exposición a ozono, que oscila entre los 7 y 20 días. Se ha reportado que en humanos también se presenta adaptación de la reactividad bronquial a metacolina tras repetidas exposiciones a ozono. Sin embargo, también se ha mostrado que sujetos expuestos 3 veces a concentraciones bajas de ozono (0.2 ppm), no presentan adaptación o desensibilización de la función pulmonar en una exposición subsecuente a concentraciones más altas de ozono (0.5 ppm). Se ha observado en humanos que la hiperreactividad de las vías aéreas persiste aunque la función pulmonar muestre adaptación (9).

Respecto a este fenómeno de adaptación se debe hacer notar que, si bien la respuesta fisiológica inmediata disminuye, no se puede asegurar que los cambios bioquímicos y morfológicos concomitantes provocados por el ozono también disminuyan (13).

La composición química del aire atmosférico seco, que se encuentra usualmente en las áreas rurales y sobre el océano, se puede observar en la tabla II.

Sustancia	Volumen (%)	Concentración (ppm)
Nitrógeno	78.084 ± 0.004	780,840
Oxígeno	20.946 ± 0.002	209,460
Argón	0.934 ± 0.001	9,340
Dióxido de carbono	0.033 ± 0.001	330
Neon		18
Helio		5.2
Metano		1.2
Criptón		0.5
Hidrógeno		0.5
Xenón		0.08
Dióxido de nitrógeno y N ₂ O		0.02
Ozono		0.01-0.04
1		

Tabla II Composición química del aire atmosférico seco.

El aire atmosférico contiene de 1 a 3 % en volumen de vapor de agua, y trazas de dióxido de azufre, formaldehído, yodo, cloruro de sodio, amoníaco, monóxido de carbono, y un poco de polvo y polen. Si los gases o partículas están en una concentración mayor o se encuentran otros elementos que dañan a persona, plantas, animales o materiales se consideran como contaminantes del aire.

Es común expresar la concentración de un contaminante gaseoso presente en el aire como partes por millón (ppm). Así

$$\frac{1 \text{ volumen de contaminante}}{10^6 \text{ volumen de aire contaminado}} = 1 \text{ ppm}$$

$$0.0001 \% \text{ en volumen} = 1 \text{ ppm}$$

La concentración también se puede expresar como microgramos de contaminante por metro cúbico de aire $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para transformar entre unidades se usan las leyes de los gases, utilizando la aproximación del gas ideal.

¹ Fuente: Handbook of Air Pollution, Publicaciones PHS AP-44 (PB 190-247), 1968 (40).

NO_x (NO + NO₂)

Los óxidos de nitrógeno se forman durante la combustión como producto de la oxidación de nitrógeno atmosférico y, en un menor grado, del nitrógeno orgánico en los combustibles.

El monóxido de nitrógeno (NO) es un gas incoloro y su concentración ambiental es menor a 0.5 ppm. A estas concentraciones, su toxicidad biológica en humanos es insignificante. Aunque es un precursor del bióxido de nitrógeno y ozono.

El bióxido de nitrógeno (NO₂) es un gas pardo rojizo y es muy visible cuando está presente en una cantidad suficiente (1 ppm). Inicialmente su concentración está por debajo del NO atmosférico. El riesgo ambiental del NO₂ está asociado principalmente con los efectos del contaminante en los pulmones. Individuos sanos expuestos a concentraciones de NO₂ entre 0.7 y 5.0 ppm durante 10 a 15 minutos han desarrollado condiciones anormales en la resistencia de los conductos pulmonares. La exposición a 15 ppm de NO₂ causa irritación en los ojos y en la nariz, y se han notado trastornos en los pulmones a 25 ppm para una exposición menor de 1 hora. Estas concentraciones son mayores que los niveles usuales atmosféricos, por lo cual carecen de importancia desde el punto de vista de contaminación.

El IMECA 100 establece valores de NO₂ de 0.21 ppm/1 hora.

Además de actuar como precursores del ozono, los NO_x pueden precipitarse en nitratos que son partículas finas que incrementan los problemas de partículas respirables, o bien generan lluvia ácida al combinarse con vapor de agua.

SO_x

Los óxidos de azufre gaseosos ambientales se presentan como bióxido de azufre (SO₂) y trióxido de azufre (SO₃). Las emisiones de estos compuestos provienen principalmente de la combustión, como resultado de la oxidación del azufre contenido en los combustibles, además de producirse en los procesos de refinación del petróleo.

Concentraciones de 0.15-0.25 ppm en un tiempo de exposición de 1-4 días y 1-2.0 ppm con duración de 3-10 minutos producen respuestas cardiorrespiratorias.

Los SO_x contribuyen a incrementar los problemas de partículas respirables y de visibilidad por medio de la formación de sulfatos y la aglomeración de otros gases y partículas con los que interactúan. La transformación de los SO_x en sulfatos involucra la formación de ácido sulfúrico, por lo que contribuyen, al igual que los NO_x, en forma importante a la producción de lluvia ácida.

CO

El monóxido de carbono proviene principalmente de la combustión incompleta en los motores de los vehículos a gasolina. Es un gas incoloro e inodoro.

Este gas, al combinarse con la hemoglobina, priva a los tejidos del cuerpo del oxígeno necesario.

Las concentraciones máximas en la ZMCM han sido del orden de 10ppm, aunque en los cruceros viales se han llegado a medir entre 80-120ppm.

La exposición durante 8 horas o más a concentraciones de 30 ppm altera ciertas pruebas psicomotoras. A 100 ppm la mayoría de las personas experimentan mareos, dolores de cabeza y cansancio. 50 ppm con 50 minutos de exposición produce cambios en el umbral de la luminosidad relativa y la agudeza visual.

El IMECA 100 establece valores de 13 ppm/8 horas.

O₃

Producto de las reacciones fotoquímicas de NO_x e hidrocarburos, éste es un gas de color azulado de olor irritante.

Produce diversos efectos en los seres vivos y en los materiales.

Este contaminante ha llegado a alcanzar las 0.45ppm en la ZMCM, y es el contaminante que sobrepasa frecuentemente la norma ya que el IMECA 100 establece valores de 0.11 ppm/1 hora.

PST (Partículas Suspendidas Totales)

Es un término empleado para describir las materias sólidas y líquidas, dispersas y arrastradas por el aire, mayores que las moléculas individuales pero menores de 500 μ de diámetro.

En la atmósfera se encuentran en suspensión partículas de origen natural (restos orgánicos de plantas y animales, esporas, virus, etc), las que provienen de los procesos de combustión (ceniza, vapores, humo, hollín, etc) y las que se forman en la atmósfera como resultado de la transformación de otros contaminantes (nitratos y sulfatos).

Entre las partículas suspendidas se encuentran las partículas menores a 10 μ (PM₁₀), que debido a su tamaño pueden ser inhaladas, lo cual incrementa el potencial tóxico y/o patógeno de sus componentes.

El IMECA 100 establece valores de 275 $\mu\text{g}/\text{m}^3/24$ horas de PST y de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3/24$ horas para PM₁₀.

En el aire, forma parte de las partículas suspendidas. Su principal fuente de emisión son los automóviles, debido al uso de gasolina con este metal. En los últimos años, ha disminuido la concentración de plomo en el aire como consecuencia de sucesivas reformulaciones de la gasolina. En febrero de 1996 se introdujo la gasolina Premium, la cual es 5% menos reactiva que la Magna-Sin en la formación de oxidantes fotoquímicos. En la tabla III podemos ver las concentraciones de plomo en las gasolinas.

Tipo de gasolina	Plomo (mg/l)
Magna-Sin	2.6
Nova	30-60
Premium	2.6

Tabla III Concentración de plomo en gasolinas de la ZMCM.

Niveles bajos de plomo en la sangre ($30 \mu\text{g} / \text{dL}$) tienen como consecuencia deficiencias neurológicas, sobre todo en niños, elevaciones modestas en presión sanguínea en adultos y problemas en el desarrollo. Niveles mayores causan daño cerebral, disminución en la conducción nerviosa, problemas de audición y anormalidades en el desarrollo incluyendo daño neurológico fetal y reducción del peso y estatura al nacer (28).

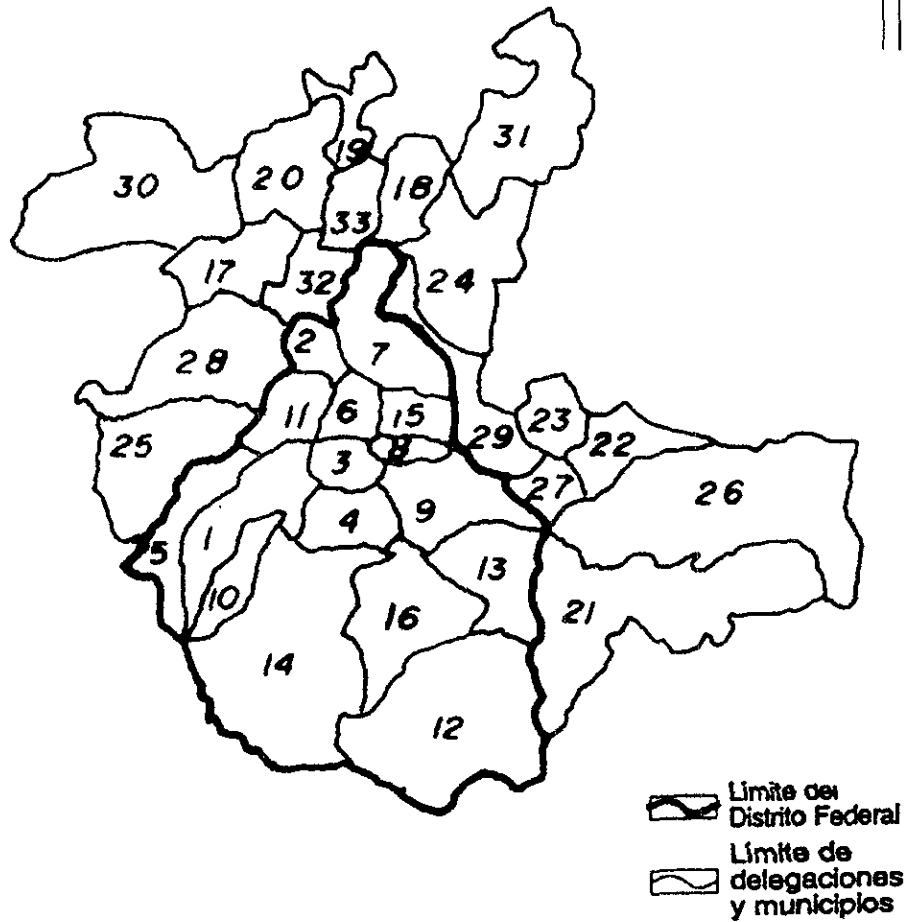
El IMECA 100 establece valores de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante 3 meses.

2.2. Causas de contaminación en las metrópolis

La mayor parte de los problemas de contaminación del aire son hoy en día consecuencia del uso de combustibles fósiles como fuente de energía.

En las metrópolis se concentra el consumo de energía debido a su gran población.

La zona metropolitana de la ciudad de México (ZMCM) comprende la continuidad urbana del Distrito Federal y 17 municipios conurbados del Estado de México (Fig.4) que integran un solo conjunto económico-poblacional, con un área de aproximadamente 2000 km^2 y alrededor de 20,000,000 habitantes.



Delegaciones del D.F.

1. Álvaro Obregón
2. Azcapotzalco
3. Benito Juárez
4. Coyoacán
5. Cuajimalpa
6. Cuauhtémoc
7. G. A. Madero
8. Iztacalco
9. Iztapalapa
10. Magdalena Contreras
11. Miguel Hidalgo
12. Milpa Alta
13. Tláhuac
14. Tlalpan
15. Venustiano Carranza
16. Xochimilco

Municipios Conurbados del Estado de México

17. Atizapán de Zaragoza
18. Coacalco
19. Cuautitlán
20. Cuautitlán Izcalli
21. Chalco
22. Chicoloapan
23. Chimalhuacán
24. Ecatepec
25. Huixquilucan
26. Ixtapaluca
27. La Paz
28. Naucalpan de Juárez
29. Netzahualcóyotl
30. Nicolás Romero
31. Tecamac
32. Tlalnepantla
33. Tultitlán

Fuente: D.D.F. / Imagen Spot - 1986.

Fig. 4 Zona Metropolitana de la Ciudad de México

nacional y representa tan solo la milésima parte del mismo territorio. El 90% de la energía en México proviene de combustibles provenientes del petróleo o de su síntesis química.

2.2.1 Situación actual

La Ciudad de México ha experimentado una de las más altas concentraciones atmosféricas promedio/hora de ozono en el mundo, para el período comprendido entre 1986-1991, en algunos centros de monitoreo de la Ciudad de México, las concentraciones máximas promedio/hora han rebasado las 0.450 ppm. Para Marzo de 1992, valores similares promedio/hora también fueron detectados. Estos valores son más altos que los que normalmente ocurren en Los Angeles, California (24) (Fig. 5).

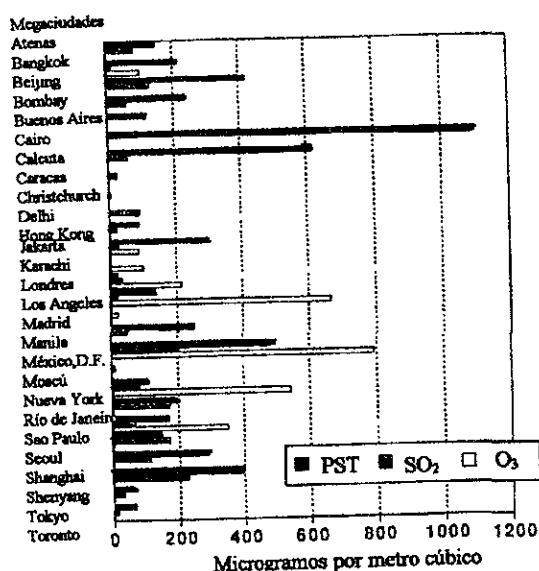


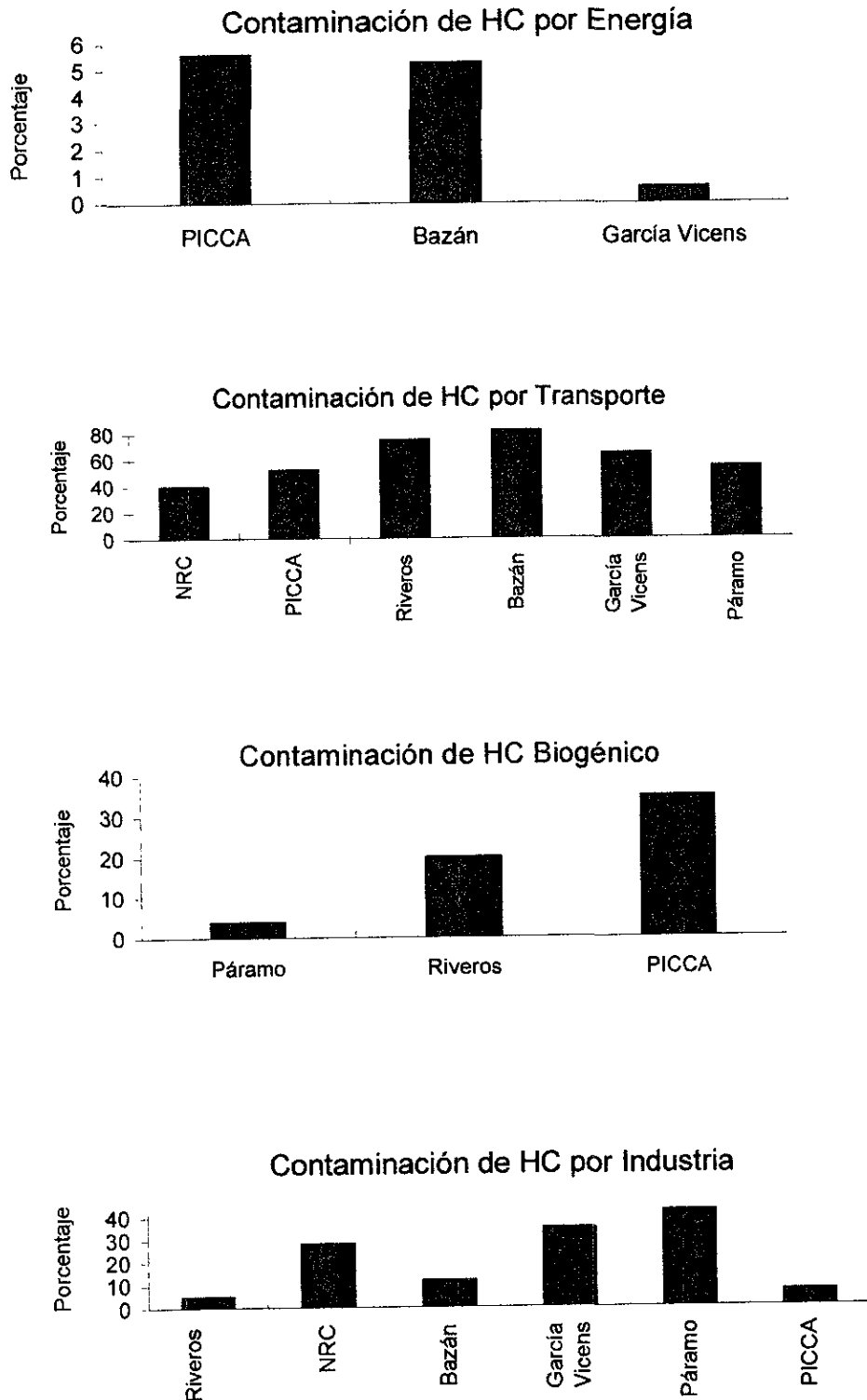
Fig. 5 Comparación de niveles ambientales del segundo día máximo de una hora de ozono, promedio anual de concentraciones de PST y SO₂ en algunas ciudades (24).

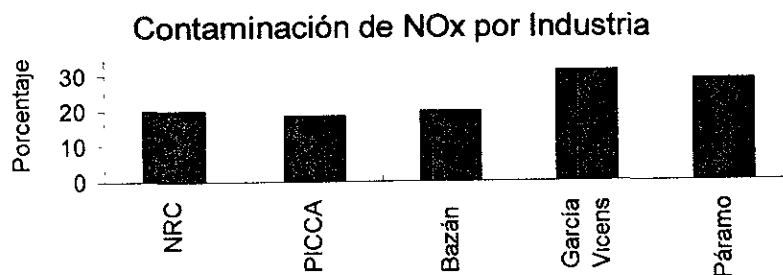
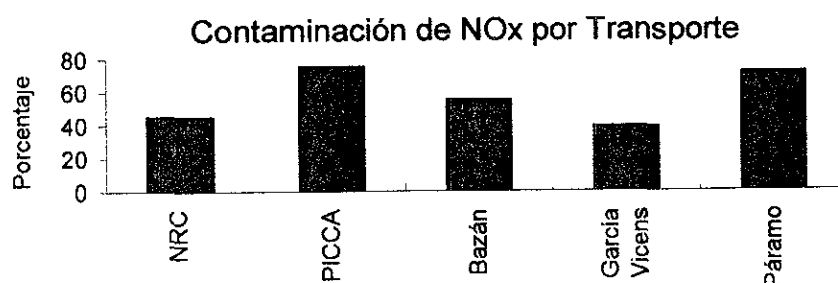
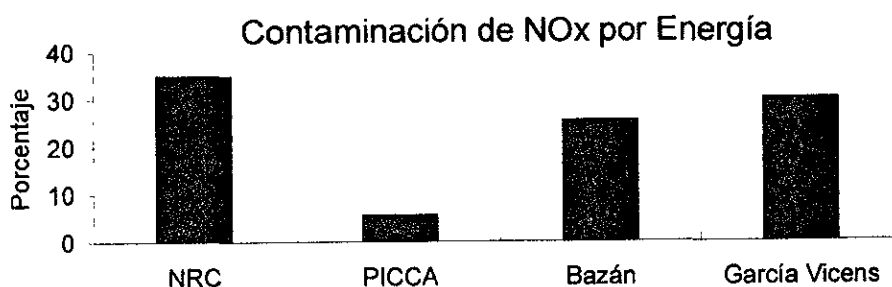
De la figura anterior se observa que la Ciudad de México tiene el primer lugar en cuanto a concentraciones de ozono con aproximadamente ($800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.408 ppm), luego le sigue Los Ángeles con ($660 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.337 ppm), Nueva York con ($540 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.276 ppm) y Sao Paulo con ($340 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.174 ppm).

En la tabla IVa y IVb se presentan las principales fuentes de precursores del ozono (óxidos de nitrógeno e hidrocarburos) y sus diferentes fuentes emisoras. Estos datos son tomados para EUA del NEDS (National Emissions Data System) y NAPAP (National Acid Precipitation Assessment Program) de 1985 (NRC, 46) y para México de diferentes autores (2, 30, 46, 50, 57).

En los países socialistas la contaminación por hidrocarburos es menor. Por ejemplo, en la República Popular de Polonia, al transporte automotor le corresponde solamente entre 10-20% de las expulsiones a la atmósfera y en la capital de Rumanía, cerca del 23%. En Rusia se asume que esta cifra debe de ser superior (30).

Tabla IVa Fuentes emisoras de hidrocarburos





Las mediciones realizadas en Teherán, Irán, indican que la parte de la influencia del transporte automotor en la formación de sustancias nocivas en la atmósfera de la ciudad es cercana al 60%.

De la tabla IV se observa que el transporte es el mayor contribuyente en cuanto a precursores del ozono en la ZMCM.

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), actualmente el parque automotor mundial supera los 400 millones de unidades, con un incremento anual de 30-40 millones y se pronostica que en el año 2000, el número de vehículos supere los 700 millones (30).

El deterioro del medio ambiente de la ZMCM es producido por la densidad poblacional, las actividades socioeconómicas, el consumo excesivo e ineficiente de energía, así como las condiciones geográficas y meteorológicas de la propia ZMCM.

Esto significa que es un problema complejo en el que se tienen que dar soluciones multidisciplinarias. No es posible resolver el problema con una sola medida sino participando todos los sectores involucrados, y siendo conscientes de la situación, para de esta manera, tener la voluntad de cambiarla.

2.2.2. Factores que agravan la contaminación por ozono en la ZMCM.

Existen una serie de factores que contribuyen a favorecer la formación de ozono en la ZMCM como son: el clima, la orografía, los sistemas de presión, las inversiones térmicas, la altura de la capa de mezcla de los contaminantes, el viento, la lluvia, además de las características demográficas.

Características orográficas y climáticas

La ZMCM se encuentra en una zona tropical a una altura de 2268 msnm en una cuenca lacustre rodeada por altas montañas que provocan la acumulación y el estancamiento de contaminantes.

A esta altura posee una alta incidencia de radiación solar y una menor concentración de oxígeno lo cual origina menor eficiencia en los procesos de combustión y por lo tanto se emiten mayor cantidad de contaminantes que a nivel del mar. Esto aunado con las grandes cantidades de precursores de ozono, emitidos por los automóviles e industrias, hacen que las características propias de la ZMCM fomenten la contaminación atmosférica.

Sistemas meteorológicos

El sistema de anticiclón es un área de alta presión con la mayor presión en el centro. El viento sopla espiralmente hacia afuera como las manecillas del reloj en el Hemisferio Norte y en contra de las manecillas del reloj en el Hemisferio Sur (Fig. 6 y 7).

a) Sistema anticiclónico en invierno

Se manifiesta entre 700 y 500 mb (milibares) el cual se ubica sobre los estados del centro del país y el valle de México. El sondeo atmosférico muestra que en la capa de aire cercana a la superficie de la tierra las inversiones térmicas no existen o son débiles, o bien se presenta una capa isotérmica. Los vientos en las capas atmosféricas son débiles, variables o en algunos estratos no existen movimientos horizontales de aire. En los meses de invierno, por la poca insolación la superficie terrestre no se calienta lo suficiente para generar los movimientos verticales característicos de las altas temperaturas en superficie, comunes en los meses de verano. Este fenómeno puede persistir varios días, siendo necesario realizar análisis en periodos de tiempo más cortos, con el propósito de elaborar pronósticos meteorológicos que permitan predecir con mayor precisión las características de la dispersión de los contaminantes.

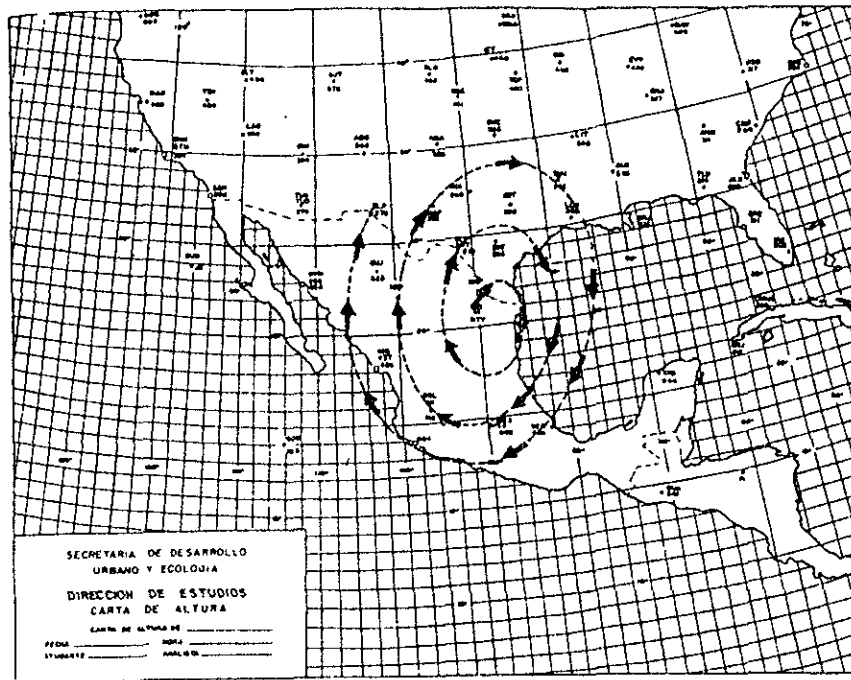


Fig. 6 Sistema anticiclónico en la atmósfera superior. En una carta de altura a escala sinóptica a 700 a 500 mb es posible identificar un sistema anticiclónico por la circulación que sigue el viento, representado por las flechas. En este caso la posición del anticiclón provoca condiciones desfavorables para la dispersión de contaminantes en el valle de México (60)

b) Sistema anticiclónico de verano

En los meses de verano se han detectado altas concentraciones de ozono alrededor del mediodía. Los análisis meteorológicos indican que en los niveles cercanos a la superficie terrestre existe la afluencia de aire cálido de origen tropical. En los análisis de 700 y 500 mb el núcleo de alta presión o anticiclónico se localiza en los estados del noreste del país o sobre el Golfo de México. Por la circulación de vientos, este sistema propicia que en el valle de México los vientos incidan débiles y del noreste y este dirigidos hacia el oeste y suroeste, permitiendo la acumulación de contaminantes en estas zonas donde encontramos las concentraciones máximas de ozono. El sondeo atmosférico revela que generalmente no se presenta inversión térmica, y que las altas temperaturas propias de esta estación del año generan movimientos verticales vespertinos, siendo ésta la causa de que los índices de los contaminantes disminuyan rápidamente después de las 15 horas.

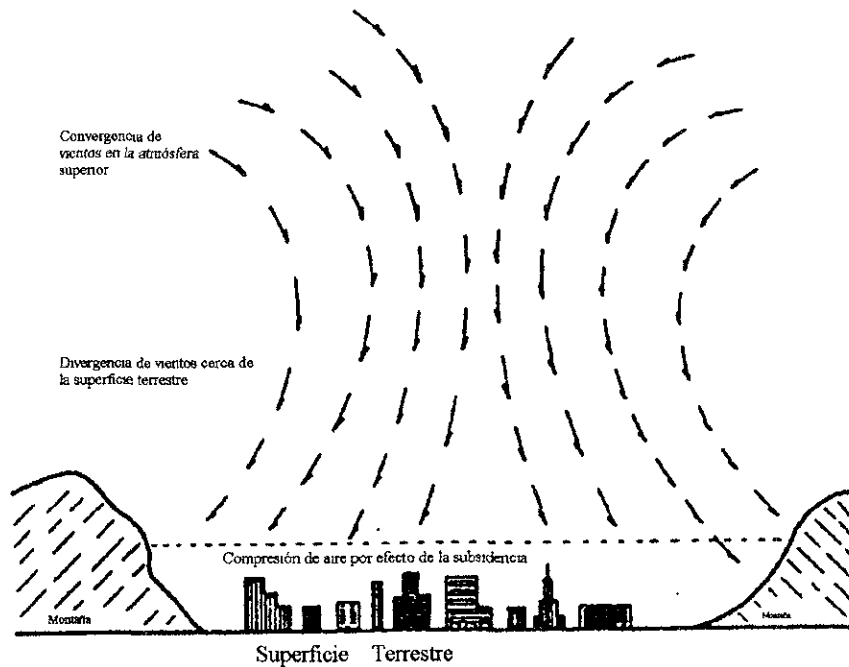


Fig. 7 Efectos de un sistema anticiclónico. El esquema representa los principales efectos de un sistema anticiclónico en la dispersión de contaminantes. Debido a la convergencia que se forma en la altura, el aire tiende a descender (subsidencia), resultando un estancamiento de los contaminantes en las capas bajas de la atmósfera (60)

c) Sistema de alta presión en superficie

En varios casos no se ha registrado inversión térmica y no se presenta sistema anticiclónico en los niveles superiores de la atmósfera; sin embargo, los niveles de concentración de ozono fueron altos. En estos casos se consideró que la causa era un sistema de alta presión en superficie, ubicado en los estados del noreste con elongación hacia el Golfo de México. Este fenómeno favorece el desplazamiento de aire frío del norte del continente a la parte oriental del país, propiciando que el aire frío llegue al valle de México y se estratifique, acumulándose los contaminantes hasta que el calentamiento de la superficie terrestre ocasiona los movimientos verticales de la atmósfera, con la consiguiente disminución de los niveles de contaminación (Fig. 8).

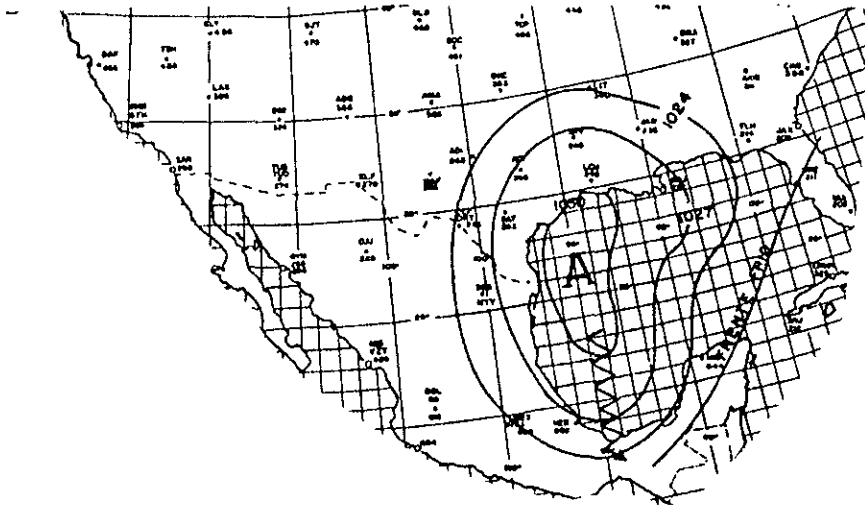


Fig. 8 Sistema de alta presión en superficie. La carta de superficie representa la variación De la presión en la horizontal, con lo que se tiene una visión de los sistemas meteorológicos que se encuentran presentes. En la figura se observa un sistema de alta presión afectando la porción oriental del país, incluido el valle de México. Este tipo de sistemas ocasionan una atmósfera estable, por lo que la dispersión de contaminantes se ve obstruida, principalmente en horas matutinas (60)

Dependiendo si los sistemas meteorológicos son estáticos o dinámicos se puede pronosticar la calidad del aire, ya que si son estáticos contribuyen a la acumulación de los contaminantes; en cambio, si son dinámicos, aun cuando la presión atmosférica sea alta y exista una inversión térmica de consideración, la dispersión atmosférica se efectúa horizontalmente, por lo que en general los niveles de contaminación no se incrementan significativamente.

Además, las características aerodinámicas generales, como el tamaño, forma y peso, afectan la tasa a la que las partículas de contaminantes no gaseosos se asientan en el terreno o son mantenidas en el aire. Por lo tanto, los factores responsables de la dispersión son los movimientos de la atmósfera los cuales, por su naturaleza, varían espacialmente y en función del tiempo. De esta manera, el comportamiento de una nube de material contaminante depende de la suma de todos los factores (temperatura, radiación solar, corrientes de convección, inversión térmica, sistema anticiclónico) que actúan sobre aquella.

Inversiones Térmicas:

Las inversiones térmicas son el caso más crítico de una atmósfera estable. En el Valle de México se dan por radiación y subsidencia. En el primer caso durante las noches, la superficie de la tierra se enfría, ya que pierde la mayor parte del calor que ganó durante el día. Como consecuencia, el suelo se enfría, y se

enfrian también las capas de aire más cercanas a la tierra. Una atmósfera seca es muy transparente a la radiación infrarroja enfriando más el suelo que cuando hay humedad y las capas frías se encuentran ahora cercanas al suelo. De esta manera no puede subir esta capa, por ser más densa, lo que conducirá a que los contaminantes no se dispersen hacia las capas superiores de la atmósfera y se acumulen sobre la ciudad. La inversión térmica por subsidencia se encuentra asociada con sistemas de alta presión, esto es cuando en los niveles superiores de la atmósfera se produce un descenso de aire (subsidencia) lo que ocasiona la compresión en las capas bajas de la atmósfera y por lo mismo una elevación en la temperatura. Si como consecuencia de la presión ejercida por las capas superiores se calientan las capas intermedias de la atmósfera a una temperatura mayor que la de las capas más próximas a la superficie, entonces se forma la llamada inversión térmica por subsidencia. Esta forma de inversión se produce generalmente a algunos cientos de metros encima de la superficie terrestre.

En ocasiones, bajo un sistema de alta presión, se pueden presentar los dos tipos de inversión en una misma zona, esto es, una con base en la superficie y la otra en una capa superior.

Cuando sale el sol se calienta el suelo y el aire cercano, hasta lograr el rompimiento de la capa de inversión. Favoreciendo la dispersión de la contaminación.

La inversión térmica inhibe los movimientos atmosféricos tanto horizontal como verticalmente. Esto da lugar al estancamiento de los contaminantes en los lugares donde se produzcan emisiones de éstos. Aumenta la actividad fotoquímica debido a que la capa de inversión es generalmente cálida, seca y despejada, de manera que permite una cantidad máxima de radiación solar, que interactúa fotoquímicamente con la elevada concentración de contaminantes atrapados, produciendo cantidades extremas de ozono.

Los parámetros de una inversión térmica se pueden observar en la Fig. 9.

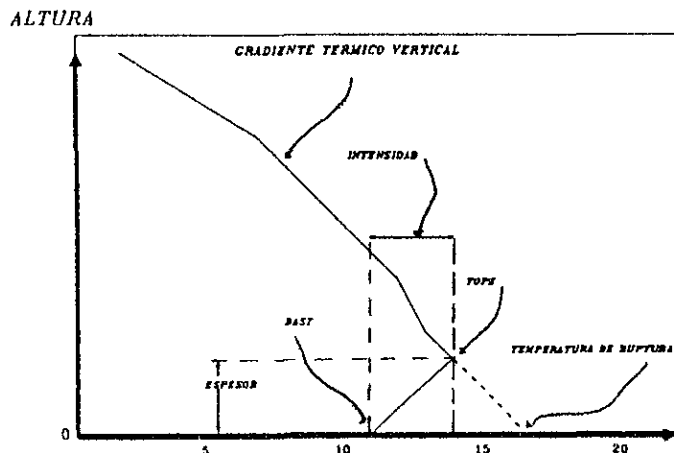


Fig. 9 Parámetros de una inversión térmica, tales como la "base", el "tope", el "espesor", la "intensidad" y la "temperatura de ruptura" (60).

Altura de capa de mezcla.

En condiciones inestables, el aire caliente (el cual puede contener contaminantes del aire) asciende y se reemplaza por aire mas fresco, aire limpio de las capas superiores frías, lo cual forma una buena mezcla. La altura a la cual el aire caliente se eleva y mezcla con el aire mas fresco hasta que encuentra su igual en temperatura se llama altura de mezclado, y es el nivel superior para la dispersión de contaminación del aire. La altura de mezclado es una función de las estaciones, la temperatura del suelo, la luz solar y otros factores meteorológicos. En un día claro de verano con luz solar, la altura de mezclado puede ser de varios miles de metros, mientras que en invierno, con temperaturas mas bajas para el suelo y menos luz solar, puede ser tan solo de cien a doscientos metros.

Se puede estimar un valor para la capa de mezcla a las 9:00 horas a partir del valor de la concentración del CO.

De CO se emiten 2 358,141 Ton/año, dividiéndolo entre 365 días y entre 14 horas (por ser el tiempo promedio de operación de emisiones de CO en el aire), tenemos 461.48×10^{12} $\mu\text{g}/\text{hora}$

Si el área de la ZMCM es de 2000 Km^2 .

Despreciando los efectos del transporte por ser hora pico y suponiendo emisión uniforme en el área de la ciudad sabemos que la **concentración** = $\frac{\text{Emisiones}}{\text{Volumen}}$ y el *Volumen* = (area)(altura)

La concentración promedio anual de 5 estaciones en el año es de $x \text{ ppm} = x \mu\text{g}/\text{m}^3$

Entonces la altura = $\frac{\text{emisiones}}{(\text{concentrac ión})(\text{área})}$

$$\text{Altura} = \frac{461.48 \times 10^{12} \mu\text{g}}{(5,714.29 \mu\text{g}/\text{m}^3) (2 \times 10^9 \text{ m}^2)} = 40 \text{ m}$$

Un cálculo similar para las concentraciones de HC en la atmósfera produce los siguientes resultados:

De HC se emiten 1, 025,759 Ton/año dividiéndolo entre 365 días y entre 14 horas, tenemos 200.74×10^{12} μg

$$\text{Entonces la altura} = \frac{200.74 \times 10^{12} \mu\text{g}}{(2,462.3 \mu\text{g}/\text{m}^3) (2 \times 10^9 \text{ m}^2)} = 41 \text{ m}$$

Análogamente para NOx (a las 11:00 horas) se emiten 128,645 Ton/año dividiéndolo entre 365 días y entre 16 horas tenemos 22.03×10^{12} μg .

$$\text{Entonces la altura} = \frac{22.03 \times 10^{12} \mu\text{g}}{(110.2 \mu\text{g} / \text{m}^3) (2 \times 10^9 \text{m}^2)} = 100 \text{ m}$$

La diferencia en las alturas es debida a que al avanzar la mañana aumenta la temperatura, y esto hace que la capa de mezcla sea mayor.

Otro efecto que hay que tomar en cuenta es la “isla de calor” asociada a las ciudades.

El área urbana absorbe mayor cantidad de energía solar durante el día (por las calles y superficies perpendiculares de los edificios) y la conserva un período mas largo durante la noche, esto aunado a la producción total normal de calor doméstico e industrial constituye el llamado efecto de “isla de calor”. En promedio hay alrededor de 5°C arriba en comparación con los alrededores de ambiente rural. Durante la noche, esta diferencia se mantiene porque las superficies de la ciudad liberan el calor absorbido durante el día con mayor lentitud que los alrededores rurales. El aire caliente tiende a concentrarse en el centro de la ciudad, debido quizás a la concentración de edificios altos y de calles pavimentadas (Fig. 10). Este aire caliente se eleva, arrastrando consigo la carga de contaminación, luego se expande y fluye hacia los bordes de la ciudad. Al expandirse el aire, se enfría, y de este modo, el aire más frío en los bordes fluirá de nuevo hacia el centro de la ciudad, cerca de la superficie del suelo. Se forma así un sistema circulatorio, que solo se podrá alterar o romper por el efecto de un viento fuerte. Las partículas pequeñas presentes en el aire sobre la ciudad tienden a reducir la energía solar e impiden de este modo que el sol caliente el aire cercano a la superficie. Se reducen las corrientes normales y verticales del aire. Y el aire inferior bajo el “domo de polvo” de la ciudad tiende a contaminarse cada vez más. Además las casas, los grandes edificios y las fábricas forman una superficie irregular que retrasa el flujo del viento (64).

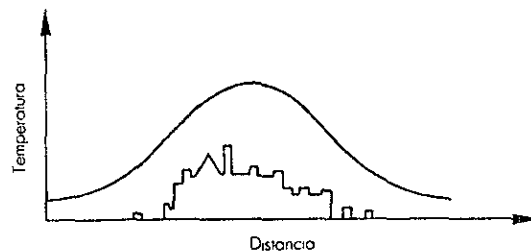


Fig. 10 Efecto de isla de calor donde se muestra la variación de temperatura sobre la ciudad

Características demográficas

En la Ciudad de México se concentra cerca del 25% de la población del país y es indispensable satisfacer sus necesidades a través de transporte adecuado, abastecimiento de víveres, etc.

Aquí se genera el 36% del producto interno bruto y se consume el 25% del total de la energía generada. Operan más de 42 mil industrias y establecimientos de servicios de diversa índole, además hay alrededor de 3,000,000 de automóviles que necesitan energéticos para funcionar.

El análisis de la problemática ambiental en el país muestra una marcada relación entre la contaminación y la orografía del medio, el tamaño y la dinámica del asentamiento humano y el crecimiento económico. La presión ejercida por el crecimiento demográfico e industrial y la falta de planeación integral del uso del suelo y sus recursos, han dado lugar a un desarrollo ambientalmente desequilibrado.

Viento y lluvias

Existen sistemas meteorológicos favorables para la dispersión de contaminantes; entre las más importantes se encuentran: un perfil atmosférico inestable, gran contenido de humedad asociada a nubosidad de desarrollo vertical productora de lluvias ligeras y moderadas, y velocidad de los vientos moderada y fuerte en las capas bajas de la atmósfera. Estas condiciones ocasionan la difusión de los contaminantes en la vertical y en la horizontal, y el lavado de la atmósfera.

Los sistemas meteorológicos que favorecen la dispersión de contaminantes son:

a) Perturbaciones tropicales

En la cuenca del valle de México los ciclones en cualquiera de sus manifestaciones (depresiones, tormentas o huracanes) no inciden directamente; sin embargo, sus efectos favorecen la dispersión de contaminantes y el lavado atmosférico. Otros sistemas de baja presión provocan la entrada de aire de características cálidas y húmedas, que favorece nublados con lluvias, e inestabilidad atmosférica. La temporada de lluvias (junio-septiembre) es en la que hay mayor incidencia de estos sistemas.

b) Corriente de vientos máximos

En los meses de invierno y primavera son característicos sistemas como la corriente de vientos máximos que ocasiona vientos moderados y fuertes del suroeste, los cuales favorecen la dispersión de contaminantes gaseosos (Fig. 11). Principalmente en febrero y marzo esta corriente provoca tolvánicas en la parte oriental del valle y zonas montañosas aledañas, originando altas concentraciones de partículas suspendidas. Otro sistema que produce efectos similares a la corriente de vientos máximos son las bajas presiones profundas en superficie, las cuales son típicas en la temporada invernal. Al igual que la corriente

de vientos máximos, estas bajas presiones, cuando cubren la parte central del país ocasionan sobre la cuenca vientos moderados y fuertes, de componente occidental, que expulsan los contaminantes fuera del valle.

La sedimentación de las partículas depende de su tamaño, lo que hace que las muy pequeñas sean arrastradas por vientos muy ligeros. Los contaminantes se pueden absorber en la superficie de las partículas suspendidas en la atmósfera. Cuando la atmósfera está sobresaturada de humedad, las partículas presentes suelen servir como centros de nucleación en el cambio de fase correspondiente. Las gotas de lluvia al caer, arrastran la contaminación limpiando el aire de la ciudad.

En verano, las lluvias de la tarde, contribuyen al descenso de contaminantes.

Se ha observado que las altas concentraciones de ozono se relacionan con valores elevados de altitud geopotencial y temperaturas, y con vientos de baja velocidad provenientes del norte (60).

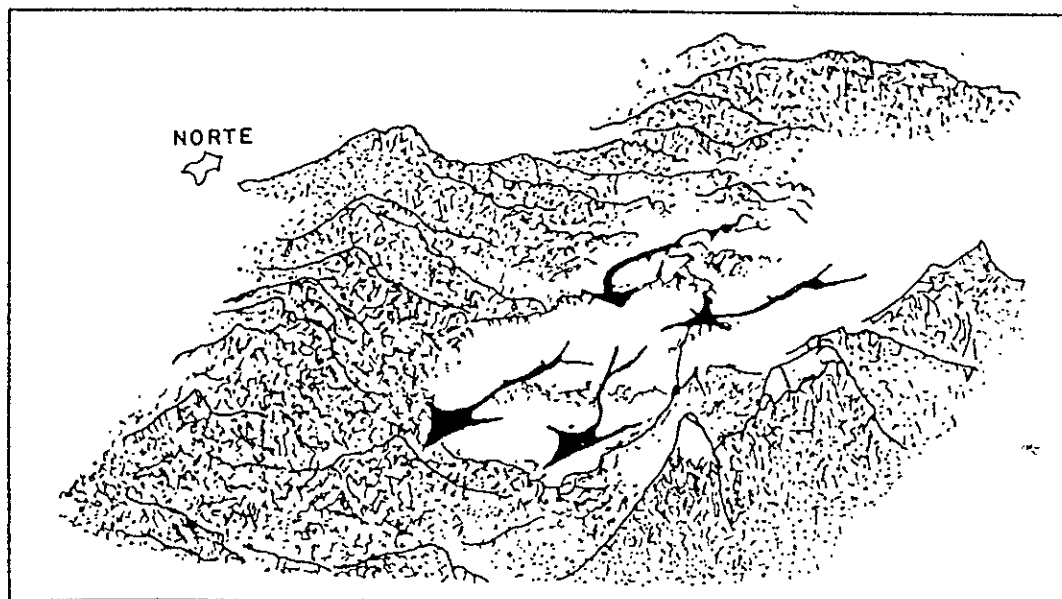


Fig. 11 Cuenca del Valle de México y el patrón regular del flujo de viento dominante

2.3 Contaminación en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

El problema de la contaminación en la ZMCM es muy complejo y es causado por la concentración de población que gira en torno a una economía centralizada. Las actividades industriales y los medios de transporte, como se vió anteriormente, son el origen de los contaminantes precursores del ozono en esta ciudad, debido al gran consumo de combustibles.

Las necesidades de transporte de la población de la ZMCM requieren ser cubiertas por un transporte colectivo eficiente, el cual no existe, lo que conlleva a hacer indispensable el uso del automóvil particular que es la mayor fuente de precursores del ozono.

El ozono ha sido el único contaminante por el cual se ha implementado el Plan de Contingencias Ambientales, por exceder el valor de 250 IMECAS.

La máxima concentración de ozono se produce entre las 11 y las 15 horas debido a que la emisión de contaminantes está ligada a las actividades humanas y al máximo de radiación solar que activa las reacciones fotolíticas que lo producen.

2.3.1. Factores de emisión del transporte de diferentes ciudades

De acuerdo a un estudio realizado por Beaton en 1992 (3), las emisiones de CO y HC en vehículos de la Ciudad de México fueron mayores que en cualquier otra parte de Norteamérica o Europa. En la figura 12. se observa que un pequeño número de carros con emisiones altas contribuyen de manera desproporcionada al total de CO emitido en la Ciudad de México.

Las observaciones de la Ciudad de México muestran que los mayores emisores (25% de la flota vehicular) contribuye con 50% del total de las emisiones, comparado con medidas a distancia de los EUA. donde solamente 10% de la flota es responsable del 50% de CO emitido. El promedio de las emisiones de este 25% es 669 g/l de CO, con la más baja emisión cerca de 529 g/l.

Los gramos de HC por litro de combustible se indican como equivalentes de propano. El promedio para la flota es 2,100 ppm HC, o 25.4 g/litro con la mediana de 60 g/gal=15.87 g/litro de HC. Los vehículos que contribuyen 50% del total de las emisiones fueron solamente 12% de todos los vehículos.

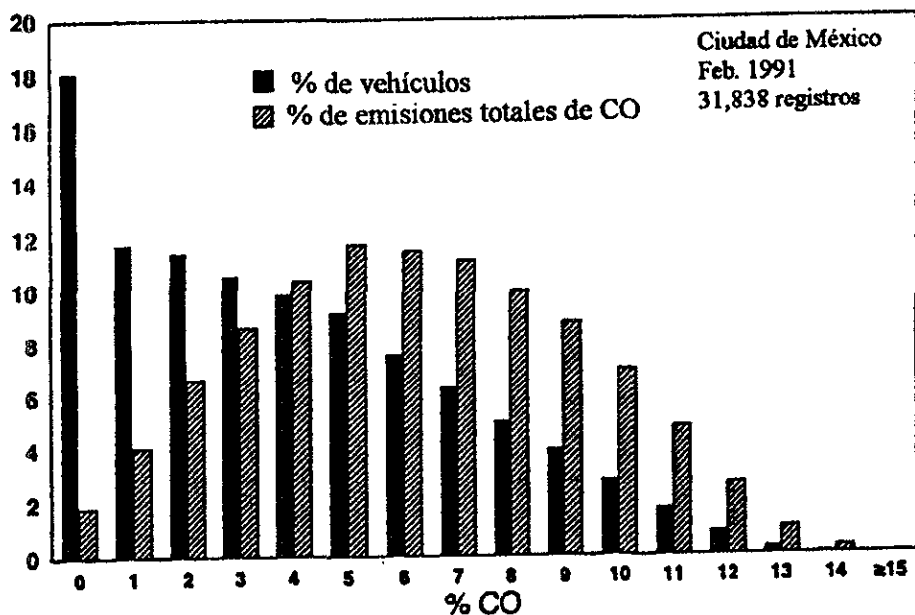


Fig. 12 Fracción de vehículos y su contribución de CO para la flota de la Ciudad de México. Las barras sólidas representan la fracción del número total de vehículos en cada tipo de medición (por ejemplo, 0 es para vehículos medidos como 0-1% de CO). Las barras rayadas representan la fracción de las emisiones totales de los vehículos en cada categoría (3).

Los vehículos que emiten 10,000 ppm (92.59 g/litro) HC, y particularmente aquellos que emiten 20,000 ppm (46.30 g/litro) de HC, es probable que tengan al menos un cilindro que no enciende. Estos vehículos son responsables por el 30% de los HC aunque ellos constituyen menos del 4% de la flota. Las emisiones tan altas observadas en la Ciudad de México son causadas por dos factores: la ausencia de mantenimiento adecuado y de equipo de control de emisiones.

Los vehículos anteriores a 1975 de Los Angeles tienen promedios menores de emisión de CO que la flota de la Ciudad de México (3).

Se hizo una recopilación de los factores de emisión diferentes países (Tabla V) y se observa que la ZMCM tiene las emisiones más altas de CO y HC. El 2º país más alto de CO es Japón y de HC es EUA.

Según EPA las evaporaciones de HC del tanque de combustible y carburador representan el 46%. Existe mucha variación en los valores de emisiones de HC y CO. En cuanto a NOx, no hay mucha incongruencia en los valores.

Los factores de emisión de CO y NOx del diesel en Canadá son más altos que en la ZMCM. solamente los HC son tres veces mayores en la ZMCM.

Gasolina	CO g/l	NOx g/l	HC g/l
Canadá	182.41	15.54	19.82
Japón	317.25	11.32	21.7
México (51)	460	14.4	52
S/convertidor PEMEX	90.55		11.93
C/convertidor PEMEX	36.44		3.97
FAP, EUA	120	16.1	41.52
EPA, EUA	315.5	12	18.5
Evaporación EPA			8.58
Stern, EUA	329.13		
Estimado	455		34.2
Diesel			
Canadá	16.19	36.06	3.75
México (51)	13.86	19.27	11.03
FAP, EUA		12	22
Combustóleo			
México (51)	0.6	6.6	0.154
EPA, EUA	0.63	9.43	0.12
Gas Natural			
México (51)	g/m3 0.64	g/m3 8.8	g/m3 0.044
FAP, EUA		g/kg 0.16	g/kg 0.005
EPA Technical document	g/m3 0.272	g/m3 11.2	g/m3 0.016
Gas LP			
Holanda	0.26	1.06	0.05

Tabla V. Factores de emisión en diferentes países.

El combustóleo no tiene mucha diferencia entre los factores de emisión de CO y los valores de EPA, son mayores en ambos casos con respecto a México. En HC tampoco hay mucha diferencia pero México tiene valores mayores que los de EPA.

En cuanto al gas natural en CO y HC México es dos y tres veces mayor que los valores de CAP, y en el caso de NOx son poco más altos los valores de CAP que los de México (20%).

Para gas natural y LP los factores son muy bajos. Los únicos valores que se encontraron para gas LP fueron los holandeses.

Los factores de emisión tan altos dados para México se obtuvieron al dividir las emisiones de contaminantes por combustible entre el consumo del mismo, y podrían ser comprobados con este cálculo:

para que ocurra una combustión eficiente se necesita una relación de aire-combustible 14.7:1, esto significa que:

1 Kg gasolina + 14.7 Kg aire = 15.7 Kg de gases expulsados por el escape de los automóviles.

Si los carros emiten 4% de CO (Riveros, comunicación personal), entonces esto corresponde a 628g de CO por kg. de gasolina (1.379 litros), lo que nos da 455g de CO por litro de gasolina.

Esto nos dice que las emisiones de los vehículos son muy altos y por el número de ellos en la ZMCM (aproximadamente 3,000,000), el transporte es la fuente emisora de NOx y HC más importante.

2.4 Contaminación por ozono en la Ciudad de México

Como se comentó anteriormente, los niveles de contaminación por ozono alcanzados en la Ciudad de México han sido niveles que afectan la salud de quienes habitan en ella, ya que disminuyen la función respiratoria, causan irritación en las vías aéreas, etc., además de dañar la flora y fauna de la región y las construcciones hechas por el hombre.

Es preocupante el saber que estos niveles afectan la salud y dañan también otras especies de seres vivos, dañando sobre todo el aparato respiratorio.

El efecto que produce el ozono puede ser reversible si después de la exposición el efecto desaparece, o irreversible si continua después de la exposición. Las concentraciones de 0.5 ppm de ozono producen alteraciones bioquímicas, morfológicas y funcionales irreversibles, aunque no se ha llegado a estos niveles en la ZMCM. Algunos de los efectos del ozono se encuentran en la tabla VI.

Concentración (ppm)	Efectos en seres vivos
0.03	Irritación nasal y de garganta, en fumadores dificultad al respirar y pérdida de la energía (13)
0.03-0.3	Reducción de la condición física de los atletas (13)
0.05-0.16	Disminución en el volumen de la expiración forzada (13)
0.1	Respuesta inflamatoria intensa en el aparato respiratoria (13)
0.12-0.2	Disminución en la función respiratoria de niños (13)
0.2	Reducción en la supervivencia de la progenie (58)
0.26	Cambios en el patrón respiratorio (9)
0.5	Formación de tumores pulmonares (45)
0.5	Alteración bioquímica, morfológica y funcional irreversible en el aparato respiratorio (13)
1.5-2.0	Reacciones temporales respiratorias y reducción de capacidad mental (13)
5.0	Transformación celular (7)

Tabla VI. Efectos del ozono en los seres vivos

Los efectos del ozono en las plantas son: reducción en la fotosíntesis e incremento en la senectud, reflejándose en un menor crecimiento de la planta.

El ozono produce degradación oxidativa en los materiales que utiliza el hombre para hacer artículos de uso común y disminuye, así, su duración.

El gobierno de México ha tomado decisiones, a partir del Programa de Contingencias Ambientales, para contrarrestar los efectos de los contaminantes atmosféricos (ver apéndice).

2.5 Datos sobre el grado de contaminación.

2.5.1 Medición de contaminantes

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) (Fig. 13) fue instalada por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), hoy Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), iniciando su operación continua en octubre de 1986. Consta de 32 estaciones, que muestrean contaminantes en diferentes puntos de la cuenca, para identificar las zonas de la ciudad con mayor contaminación del aire.

Los contaminantes que son medidos por la RAMA son: óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono, hidrocarburos, y en estaciones manuales se puede medir: plomo, PST, PM₁₀ y aldehídos. Además de que en 10 estaciones se obtienen parámetros meteorológicos como: dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

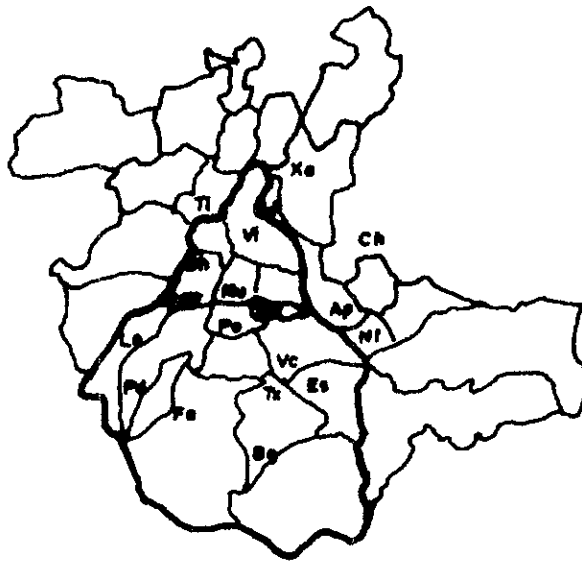
La RAMA lee cada minuto almacenando el promedio/hora las 24 horas de cada día. Los monitores toman muestras de aire entre 4 y 6 metros sobre el suelo, a un flujo de 2 litros/minuto. Se reporta diariamente desde las 7:00 hasta las 21:00 horas los 365 días del año.

Con base en la información generada por la RAMA, SEMARNAP emite diariamente un reporte sobre la calidad del aire en la forma de Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), el cual describe numéricamente los niveles de contaminación. La determinación del IMECA se realiza a partir de promedios horarios ponderados por medio de valores de referencia.

Un índice de calidad del aire se puede definir como una función de transformación de los datos de niveles de concentración de contaminantes a un valor simple, representativo de la calidad del aire en una región determinada.

El IMECA fue elaborado con la asesoría del Dr. Wayne Ott de la EPA de los EUA (Tabla VII). La base científica del IMECA es el Índice Estandarizado de Contaminación (PSI), realizado por Ott y Thom en 1979, el cual fue adoptado en los Estados Unidos como índice nacional uniforme de calidad del aire.

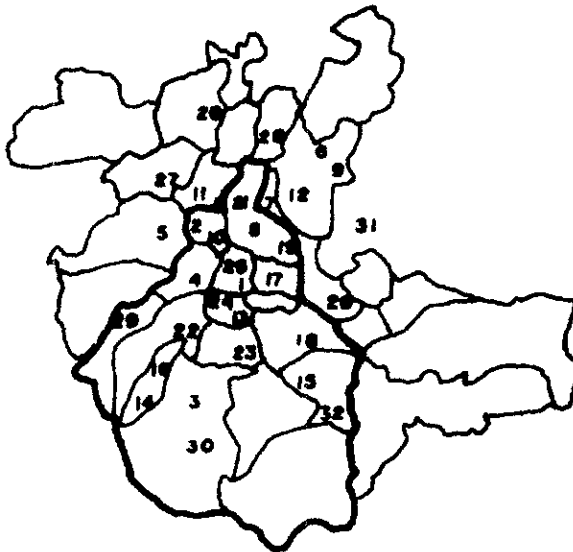
Red Manual de Monitoreo Atmosférico



Estación

- Po-Portales
- Pd-Pedregal
- Fa-Felipe Angeles
- Tx-Taxqueña
- Es-Cerro de la Estrella
- Vc-Vicentina
- Nt-Nezahualcóyotl
- Ap-Aeropuerto
- Be-Fray Bernardino
- Mu-Museo Cd. de México
- Mc-Merced
- CFE-Museo Tecnológico
- Lo-Lomas
- Sh-Secretaría de Hacienda
- Tl-Tlalnepantla
- Vi-La Villa
- Xa-Xalostoc
- Lp-La Presa
- Ch-Chapingo

Red Automática de Monitoreo Atmosférico



- 1-Lagunilla
- 2-Vallejo
- 3-Santa Ursula
- 4-Tacuba
- 5-ENEP Acatlán
- 6-Los Laureles
- 7-La Presa
- 8-La Villa
- 9-San Agustín
- 10-Azcapotzalco
- 11-Tlalnepantla
- 12-Xalostoc
- 13-Merced
- 14-Pedregal
- 15-Cerro de la Estrella
- 16-Plateros
- 17-Hangares
- 18-UAM Iztapalapa
- 19-Aragón
- 20-Nezahualcóyotl
- 21-IMP
- 22-Benito Juárez
- 23-Taxqueña
- 24-Insurgentes
- 25-Cuicilahuac
- 26-Tultitlán
- 27-Atizapán
- 28-Villa de las Flores
- 29-Cuajimalpa
- 30-Tlalpan
- 31-Chapingo
- 32-Tláhuac

Fig. 13 Distribución de estaciones en la ZMCM de la Red Manual y Automática de Monitoreo Atmosférico

Índice	Descripción IMECA	Ott y Thom	NAAQS
0-50	Situación muy favorable para la realización de todo tipo de actividades físicas	Bueno	Bajo la norma
51-100	Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades	Satisfactorio	Bajo la norma
101-200	Aumento de molestias en personas sensibles	Malo para la salud	Sobre la norma
201-300	Aumento de molestias e intolerancia relativa al ejercicio en personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares. Aparición de ligeras molestias en la población en general	Peligroso	Alerta
301-400	Aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población sana	Peligroso	Aviso
401-500	Aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población sana	Peligroso	Emergencia
501 ó +	(No se describe)	Daño significativo para la salud humana	

Tabla VII Comparación entre la descripción del IMECA, la del índice de Ott y Thom y la de norma NAAQS, para distintos niveles de contaminación del aire (26).

IMECA	Calidad del aire	PST (24h)	PM10 (24h)	SO2 (24h)	NO2 (1h)	CO (8h)	O3 (1h)
		µg/m ³	µg/m ³	ppm	ppm	ppm	ppm
0-100	Satisfactoria	275	150	0.13	0.21	13	0.11
101-200	No satisfactoria	546	350	0.35	0.66	22	0.23
201-300	Mala	637	420	0.56	1.10	31	0.35
301-500	Muy mala	1000	600	1.00	2.00	50	0.60

Tabla VIII Concentraciones límite de la escala IMECA y criterios de calificación. Contaminante y tiempo de promedio

El IMECA consta de dos algoritmos de cálculo fundamentales; el primero, para la obtención de los subíndices correspondientes a diferentes indicadores de la calidad del aire, y el segundo, para la combinación de éstos en un índice global.

Contaminante	Tiempo de promedio ^a	Concentración límite
Bióxido de azufre (SO ₂)	24 horas	0.13 ppm
Monóxido de carbono (CO)	8 horas	13 ppm
Ozono (O ₃)	1 hora	0.11 ppm
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	1 hora	0.21 ppm
Partículas Suspendidas Totales (PST)	24 horas	275 µg/m ³
Partículas suspendidas menores a 10µ (PM ₁₀) ^b	24 horas	150 µg/m ³

Tabla IX Criterios de evaluación de la calidad del aire (51).

El primero involucra la utilización de funciones segmentadas basadas en dos puntos de quiebre principales, los cuales se obtuvieron a partir de los criterios mexicanos de calidad del aire y de niveles para los cuales existen evidencias de que ocurren daños significativos a la salud. Al primero se le asignó arbitrariamente el valor de 100, y al segundo el de 500; entre estos dos puntos se definieron tres más, los cuales tienen por objeto clasificar el intervalo en diferentes términos descriptivos de la calidad del aire.

El valor de 100 representa la calidad del aire considerada como adecuada para la protección de la salud de la población y corresponde a los valores de los Criterios de Calidad del Aire; el de 500, a una situación en la cual la ciudadanía puede verse afectada (Tabla VIII y IX).

Estos niveles de contaminación están asociadas a las fases I, II y III del Plan de Contingencias Ambientales, para los cuales existen medidas específicas para cada caso (5).

Los umbrales del IMECA 100 con respecto al ozono (0.11ppm/hora) son algo más permisivos que los aceptados en otros lugares como Japón (0.06ppm/hora) que tiene la norma más estricta en el mundo o California, EUA (0.08ppm/hora).

^a Los criterios de evaluación de México no especifican la frecuencia anual con que puede aceptarse que se exceda el límite.

^b El criterio de evaluación de partículas menores a 10 µ no es oficial.

2.6. Fuentes contaminantes

Las emisiones de las fuentes contaminantes están directamente relacionadas con el consumo de combustibles y el crecimiento continuo del consumo de combustibles nos habla del crecimiento de la urbe. Dependiendo de la fuente contaminante es el tipo de combustible utilizado.

En la tabla X se presenta el consumo de combustibles en la ZMCM de 1986, 1990, 1991 y 1994 y los factores de emisión de los combustibles para obtener así las emisiones de contaminantes a la atmósfera.

Combustible ^o	Picca 86	pemex86	Bazán 90	Pemex90	Quadri91	pemex91	Menéndez 91	DDF 94	alamos91
Gasolina	5312	5070	6147	5407	5761	6286	6150	6674	5789
Diesel	1846	1499	1648	1391	1364	1210	1510	1161	1839
Combustóleo	1196	360		723	1403	269	138	0	1756
Gas L.P.	1927		3349		2826		2902	4469	3224
Gas natural	134		355000		307.2		¹ be2238	be1277	IMP3617
Electricidad	1343		137777		153600				
Gasóleo			774		56	1787			
Turbosina			66258					871	
Petróleo								290	
Kerosina								348	

Datos en millones de litros por año

Tabla X Consumo de combustibles en la ZMCM

El consumo de gasolina en el sector transporte representa el mayor gasto relativo de energía y la mayor aportación de contaminantes con respecto al volumen total.

Se emitieron 4,000,650.88 toneladas de diversas sustancias, de las cuales 58.9% corresponde a CO, 25.6% a HC, 11.27% a PST, 3.22% a NO_x y 0.93% a SO₂. Del total de emisiones, 75.43% corresponde a las emisiones generadas por fuentes móviles, 12.97% por fuentes fijas y 11.6% a fuentes naturales (Tabla XI).

¹Barriles equivalentes de petróleo.

Tabla XI Emisiones de contaminantes en la ZMCM (Páramo, 1995).

Emisión anual por tipo de fuente (ton/año)						
Tipo de Fuente	PST	SO2	CO	NOx	HC	TOTAL
Industria(1)						
Generación de energía eléctrica	162.72	19.32	1291.08	17,854.92	97.32	19,425.36
Refinación de petróleo/petroquímicas	6.84	84.96	4.68	28.44	157.56	282.48
Industria química	973.68	3,442.92	2,600.64	2,476.68	7,198.37	16,692.29
Minerales metálicos	549.84	621.84	1,458.36	553.44	461.04	3,644.52
Minerales no metálicos	1,675.32	11,710.56	323.28	4,933.56	3,167.64	21,810.36
Productos vegetales y animales	111.36	841.80	40.08	260.16	238.68	1,492.08
Madera y derivados	384.36	3,912.24	463.32	1,821.96	1,442.40	8,024.28
Productos de consumo alimenticio	799.32	2,110.56	405.96	1,069.44	397.08	4,782.36
Industria del vestido	459.96	2,404.80	733.92	1,091.16	605.04	5,294.88
Productos de consumo (varios)	66.60	108.72	74.16	678.36	303.84	1,231.68
Productos de impresión	775.92	19.44	15.00	13.68	5,015.04	5,839.08
Productos metálicos	196.92	559.08	653.40	467.88	1,547.64	3,424.92
Productos de consumo de vida media	98.88	37.80	100.68	69.96	599.40	906.72
Productos de consumo de vida larga	93.36	172.20	523.80	196.20	2958.60	3,944.16
Artes gráficas(2)	0	0	0	0	8,787.80	8,787.80
Otros	2.64	5.16	7.68	4.08	121.32	140.88
Servicios(2)						
Lavado y desengrase (2)	0	0	0	0	29,044.28	29,044.28
Consumo de solventes (2)	0	0	0	0	42,005.30	42,005.30
Almac. y distribución de gasolina	0	0	0	0	20,127.12	20,127.12
Mercadeo y distribución de gas LP	0	0	0	0	242,272.03	242,272.03
Oper. de lavado en seco (tintorerías)	0	0	0	0	12,213.40	12,213.40
Superficies arquitectónicas	0	0	0	0	21,597.84	21,597.84
Panaderías	0	0	0	0	2,290.90	2,290.90
Pintura automotriz	0	0	0	0	5,975.50	5,975.50
Pintura de tránsito	0	0	0	0	3,381.05	3,381.05
Esterilización en hospitales	0	0	0	0	20.12	20.12
Incineración en hospitales	0	0	0.54	0.51	0.02	1.07
Uso de asfalto	0	0	0	0	19,095.32	19,095.32
Plantas de tratamiento de aguas res.	0	0	0	0	56.10	56.10
Combustión en hospitales	8.13	20.13	18.43	73.57	2.89	123.15
Combustión residencial	372.10	1,483.23	729.50	3,807.70	289.73	6,682.26
Combustión comercial/institucional	696.54	5,713.44	199.66	1,457.14	61.22	8,128.00

Tabla XI (Continuación)

Transporte (4)						
Auto particular	10,321.00	2,408.00	1,044,008.00	31,913.00	253,865.70	1,342,515.70
Pick-up	1,091.00	254	73,419.40	2,675.30	19,373.64	96,813.34
Microbus	397.00	93.00	224,077.60	9,395.70	66,472.89	300,436.19
Combi			134,954.00	4,918.00	35,108.70	174,980.70
Taxi			529,530.00	15,982.00	126,574.80	672,086.80
Autobus (R-100)	1,900.00	366.00	5,655.00	6,751.30	2,337.20	17,009.50
Foráneos, suburbanos	120.00	28.00	57,332.70	2,485.60	2,055.10	62,021.40
De carga	360.00	84.00	271,321.10	5,867.60	46,099.68	323,732.38
De carga (mas de dos ejes)	1,902.00	266.00	4,735.80	7,204.00	2,079.50	16,187.30
Autobús municipal	2,075.00	400.00	1,777.70	2,591.40	781.6	7,625.70
Locomotoras	0	0	50.52	414.00	16.84	481.36
Locomotoras de patio	0	0	52.12	293.96	29.59	375.67
Aeropuerto	0	0	1,583.23	1,294.89	523.43	3,401.55
Suma de los contaminantes (transporte)	18,166.00	3,899.00	2,348,497.17	91,786.75	555,318.67	3,017,667.59
Porcentaje por sectores (transporte)	4.03	10.49	99.59	71.35	54.14	75.43
Vegetación (5)						
Vegetación	0	0	0	0	38,909.00	38,909.00
Suelos (6)						
Suelos	425,337.00	0.00	0	0	0	425,337.00
Total	450,937.49	37,167.20	2,358,141.34	128,645.59	1,025,759.26	4,000,650.88

	PST	SO ₂	CO	NO _x	HC	TOTAL
Suma de los contaminantes(industria)	6357.72	26051.40	8696.04	31,519.92	33098.77	105,723.85
Porcentaje por sectores(industria)	1.40	70.09	0.36	24.50	3.22	2.64
Suma de los contaminantes (servicios)	1076.77	7,216.80	948.13	5,338.92	398,432.82	413,013.44
Porcentaje por sectores (servicios)	0.23	19.42	0.04	4.15	38.84	10.32
Suma de los contaminantes (transporte)	18,166.00	3,899.00	2,348,497.17	91,786.75	555,318.67	3,017,667.59
Porcentaje por sectores (transporte)	4.03	10.49	99.59	71.35	54.14	75.43
Suma de los contaminantes (vegetación)					38,909.00	38,909.00
Porcentaje por sectores(vegetación)	0	0	0	0	3.79	0.97
Suma de los contaminantes (suelos)	425,337.00	0.00	0	0	0.00	425,337.00
Porcentaje por sectores (suelos)	94.32	0.00	0	0		10.63

La industria de la ZMCM es una actividad que representa más de la tercera parte del valor de la producción manufacturera a nivel nacional. La mayor concentración industrial se localiza en la parte norte del D.F., principalmente en la delegación de Azcapotzalco, y los municipios aledaños del Estado de México. Esto ha tenido un impacto ambiental y urbano considerable.

La industria consume gas natural y gasóleo, la pequeña y la micro industria utiliza diesel. En cuanto a los servicios, el DDF estima que hay más de 11,000 establecimientos mercantiles o de servicios ubicados en el D.F. que presentan emisiones a la atmósfera; entre estos se encuentran hoteles, baños públicos, lavanderías, tortillerías, panaderías, etc.

Las emisiones biogénicas de hidrocarburos no metanogénicas (EBHNM) aparecen en una concentración del 3.79% con respecto a los hidrocarburos totales emitidos en la ZMCM.

El transporte es un sector muy importante para la realización de las actividades cotidianas, el mayor porcentaje es de vehículos privados (85%). Sin embargo, los autos privados solo cubren el 16% de la demanda de viajes-persona-día y los vehículos de servicio público, con 13% del parque vehicular, absorben el 84% restante (51).

La calidad de los combustibles, el estado del motor, las condiciones de manejo, etc. influyen en la emisión de contaminantes por el transporte.

La toxicidad de las emisiones vehiculares depende en gran manera del régimen de tránsito, ya que la mayor cantidad de sustancias tóxicas las expulsan los vehículos durante la aceleración, el frenado y la marcha en vacío.

La mayor parte de la electricidad que se consume en la ZMCM, proviene de centrales de generación lejanas que pueden aprovecharse gracias al Sistema Interconectado Nacional. La parte que se genera en el Valle de México proviene básicamente de gas natural y la contaminación ambiental derivada de su combustión es de poca importancia.

2.7 Fuentes Secundarias de Contaminación.

Existen una serie de fuentes de menor importancia que, aunque no sean significativas, contribuyen a agravar el problema, por ejemplo:

- La materia orgánica de las aguas negras y la basura que al descomponerse generan gases contaminantes como metano.
- El humo del tabaco y del cigarro es desde luego un contaminante de la atmósfera.
- La vegetación en los bosques alrededor de la ZMCM e inclusive dentro de ella como el de Chapultepec, San Juan de Aragón, etc. y otras áreas como el Ajusco, Pedregal de San Angel, Desierto de los Leones, parques nacionales como el del Tepeyac y cerro de la Estrella y otros emiten hidrocarburos biogénicos a la atmósfera.
- Producen contaminación las evaporaciones de gasolina al llenar el tanque del auto, fugas de aceite, las partículas de hule quemado de las llantas de los vehículos y al hacer el asfaltado de las calles.
- También la evaporación de pinturas, perfumes, lociones, aerosoles, etc. emite hidrocarburos en la atmósfera.

2.7.1 El Transporte en la ZMCM.

El área de la ZMCM tiene 2 administraciones con políticas, recursos y normatividad propios.

No existen límites entre el D.F. y el Estado de México en cuanto a la generación de viajes y la movilidad. A pesar de esto se siguen presentando diferencias significativas en recursos destinados al transporte, inadecuada coordinación administrativa y diferencias importantes en la calidad del servicio y en las tarifas.

El metro tiene 178 km, con algunas líneas que llegan hasta el Estado de México, a pesar de esto, el servicio satisface únicamente al 13.4% de la demanda cotidiana de viajes en la ZMCM. Se observa, sin embargo, que sólo 3 de las líneas absorben la mayor parte de la demanda, pudiéndose corregir esta situación al aumentar la densificación de la red.

El sistema de transporte de trolebuses y tren ligero tiene una mediana capacidad y es poco contaminante, pero contribuye tan solo con el 0.6% de la demanda de viajes.

El transporte público en autobuses, por otro lado, ha bajado su productividad y rendimientos económicos y ha aumentado la burocracia y los subsidios. Esta situación condujo a la quiebra de la empresa Ruta-100. El vacío dejado por los autobuses, fue llenado por servicios de transporte (combis y microbuses) de menor capacidad, menos eficientes, más problemáticos operacionalmente y relativamente más contaminantes.

Por la falta de opciones atractivas de transporte colectivo, las personas tratan de conservar las ventajas relativas, como la comodidad, la autonomía y la flexibilidad que ofrece el automóvil privado aunque esto represente mayores costos y tiempos de traslado.

El hecho de que más del 70% de los viajes se hagan en automóviles y vehículos de transporte colectivo de baja capacidad (combis, minibuses y microbuses) que ocupan un espacio vital de la vialidad disponible y a que la mayoría de ellos (60%) carezca de dispositivos anticontaminantes (como convertidores catalíticos), explica en buena medida los problemas de tránsito y de contaminación que se observan cotidianamente en la ZMCM.

El consumo de gasolinas para el transporte de personas en vehículos particulares puede reducirse en forma importante si se fomenta el uso compartido de los automóviles. El nivel actual es de 1.4 personas por viaje, si se pasara a 3 personas por viaje y se reduce el número de viajes por automóvil en un 20% se podría obtener una reducción de hasta 44% en el consumo de gasolina en el área. Esto disminuiría las emisiones de contaminantes, el tráfico y los congestionamientos; también disminuiría la necesidad de estacionamientos y de centros de distribución de combustible.

La edad promedio de la flota que circula en la ZMCM es de 10 años. Los vehículos antiguos no tienen sistemas de control de emisiones (Tabla XII).

Tabla XII Edad de la flota vehicular en EUA y ZMCM		
Edad de la flota vehicular (%)		
Edad	Zona Oeste (EUA)	Z. M. C. M.
0 a 4 años	35.3	15.0
5 a 9 años	36.2	32.0
10 a 14 años	20.8	38.0
15 y más años	7.7	15.0

Fuente: Dynamis. Boletín de energía de la UNAM. 1992.

Existen otros problemas no menos importantes como el estacionamiento ilegal en la vía pública que afectan el buen funcionamiento del transporte, la carencia de opciones de transporte, el crecimiento acelerado del parque vehicular y la escasez de recursos humanos y materiales para ejercer una vigilancia estricta, Al igual que la insuficiente infraestructura vial lo que provoca frecuentes congestionamientos de tráfico, incrementando la emisión de contaminantes.

Es necesario mencionar los esfuerzos realizados por PEMEX para mejorar la calidad de los combustibles, que han permitido reducciones de más del 80% del contenido de plomo en la gasolina Nova y la utilización, a partir de septiembre de 1990, de gasolinas con bajo contenido de plomo (Magna SIN) la cual se recomendó para los vehículos fabricados en 1991, y fué obligatorio para los automóviles equipados con convertidor catalítico a partir de 1992. La venta de este tipo de gasolina representa el 36% del total de consumo de dicho combustible en México. Así mismo, las reducciones de azufre en los combustibles permitió bajar el SO₂ en la atmósfera (las concentraciones de azufre del diesel es 0.05%, de la gasolina Nova 0.15% y la Magna SIN 0.1%).

2.7.2 Emisiones evaporativas

Las impurezas del aire provenientes del escape de un automóvil convencional son hidrocarburos no quemados, CO, NOx y materia en forma de partículas; pero los hidrocarburos también se emiten a través de otras partes del motor. El estado de las juntas en el motor del automóvil determina las fugas de gasolina y aceite, que contribuyen a las emisiones evaporativas. Este tipo de fugas se detectan por el aspecto sucio

del motor, debido al polvo que se pega en estos lugares; la mancha sucia debajo de donde se estaciona el coche indica la existencia de fugas masivas de hidrocarburos que se evaporan, contribuyendo a elevar la concentración de éstos en el aire.

Los hidrocarburos emitidos de los motores de los vehículos, como ya se dijo, resultan de la combustión incompleta de combustible o de su vaporización, y estas son tanto emisiones del escape como evaporativas. Las emisiones del escape incluyen el combustible no quemado o parcialmente quemado y el aceite lubricante quemado al llegar a la cámara de combustión. Las emisiones evaporativas incluyen el vapor de combustible que escapa del carburador, el calentamiento del tanque de combustible, evaporación del motor de la máquina después de que ésta ha sido apagada, del sistema de combustible mientras el vehículo está operando, la pérdida de combustible debido al goteo y la difusión a través de los materiales que lo contienen y el vapor de combustible que escapa como resultado del llenado de los tanques (46).

Según Riveros *et al.* (57), en vehículos con carburador, aproximadamente el 30% de los HC sale por el tubo de escape, y el 70% corresponde a pérdidas evaporativas. Mientras que para Strauss (64) la distribución aproximada de emisiones de hidrocarburos en vehículos no controlados es 60% a través del tubo de escape, 20% a través del carter y el restante 20% casi tiene igual proporción a partir del carburador y del tanque de combustible. Las emisiones del carter, ahora se controlan mediante el retorno de los gases del carter hacia adentro del sistema o carburador, recuperando los hidrocarburos mediante la válvula de Ventilación Positiva del Cártter (VPC). Al apagar el motor, el carburador queda lleno de gasolina en contacto con la masa caliente del motor, lo que produce evaporaciones a través del respiradero del depósito y de sus juntas. El aire del tanque de gasolina saturado de sus vapores, se expande durante el día escapando a la atmósfera cuando el tapón está en mal estado. Las emisiones evaporadas que surgen del tanque de combustible y del depósito del carburador se controlan al desahogar estos últimos a través de una placa de carbón activado. Por ejemplo, cuando un vehículo permanece estacionado bajo la luz solar la gasolina se evapora y se absorbe en la placa de carbón activado. Al ponerse de nuevo en marcha el automóvil, el aire (después de pasar a través del purificador de aire) se arrastra a través del carbón activado, donde recoge la gasolina y la transfiere de regreso hacia la admisión del motor, lo cual produce una mezcla ligeramente mas rica en la cámara de combustión (64).

3.1. Convertidores Catalíticos

Desde 1836 J.J. Berzelius introdujo el término de catálisis para describir todos los procesos en los cuales la velocidad de la reacción es influida por la presencia de una sustancia sin ser ésta apreciablemente consumida o degradada químicamente en el proceso, esta sustancia es definida como “catalizador”.

La actividad de un catalizador se define como el cambio al cual la reacción ocurre en condiciones de estequiometría, esta actividad es fuertemente influenciada por la presión y la temperatura, aunque frecuentemente incrementar la temperatura puede acortar la vida del catalizador o puede producir reacciones térmicas indeseables (14).

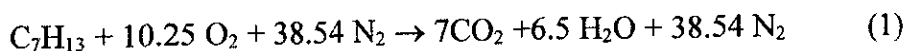
3.1.1. Funcionamiento de un motor

Una máquina de combustión interna produce potencia del motor cuando los hidrocarburos del combustible son quemados dando como resultado CO_2 y agua, pero también por combustión incompleta son emitidas cantidades no deseadas de CO , HC y NO_x .

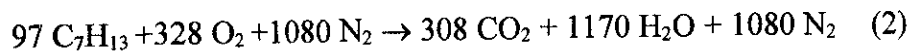
Si falta aire, quedan hidrocarburos sin quemar; si sobra, se forma NO_x al combinarse el oxígeno excedente con el nitrógeno del aire. Es necesario que la proporción entre la cantidad de combustible y la de aire que se introduce en la cámara de combustión del motor se ajuste a unos límites determinados.

Para los motores de gasolina de cuatro tiempos, se puede calcular la cantidad teórica de aire requerida para quemar completamente el combustible, considerando la ecuación de la reacción química total empleando un combustible teórico para representar la mezcla real de los hidrocarburos.

Por ejemplo, sobre una base molar (tomando C_7H_{13} como hidrocarburo promedio)



Y sobre una base de masa, como kilogramos



La combustión completa o teórica, mostrada por las reacciones anteriores, se define como la total conversión del carbono a CO_2 y el hidrógeno a H_2O . Dicha reacción se conoce frecuentemente como la reacción estequiométrica. Resulta provechoso definir la razón de mezcla, o relación entre el aire y el combustible (A/C). Esta es la relación de la masa de aire requerida por masa unitaria del combustible que se ha de generar. Esto es:

$$\text{relación o cociente de mezcla} = A/C = \frac{\text{Masa de aire}}{\text{Masa de combustible}}$$

Se observa, con fines comparativos, que la relación estequiométrica combustible-aire es muy útil. En términos de la ecuación (2), esto será

$$(A/C) \text{ estequiométrica} = \frac{328 + 1080}{97} = 14.5$$

Este valor es típico de las relaciones estequiométricas entre el aire y el combustible para muchos hidrocarburos individuales o mezclas de los mismos.

Los convertidores catalíticos se utilizan para controlar las emisiones de compuestos potencialmente dañinos en los gases de escape de los vehículos que utilizan la gasolina como combustible, estos son HC y CO que hay que oxidar y NOx que hay que reducir.

3.1.2. Tipos de Convertidores

En la evolución de los convertidores catalíticos se han ido probando distintos sistemas, tanto en relación a metales activos como a soportes. Esto se puede apreciar en la fig. 14, donde se muestra un convertidor oxidativo y uno de tres vías, que posee más funciones catalíticas (12).

La catálisis oxidativa, capaz de remover monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados, se introdujo en 1975 y los catalizadores llamados de tres vías diseñados para remover simultáneamente estos dos contaminantes junto con óxidos de nitrógeno fueron introducidos en 1981 en EUA (20).

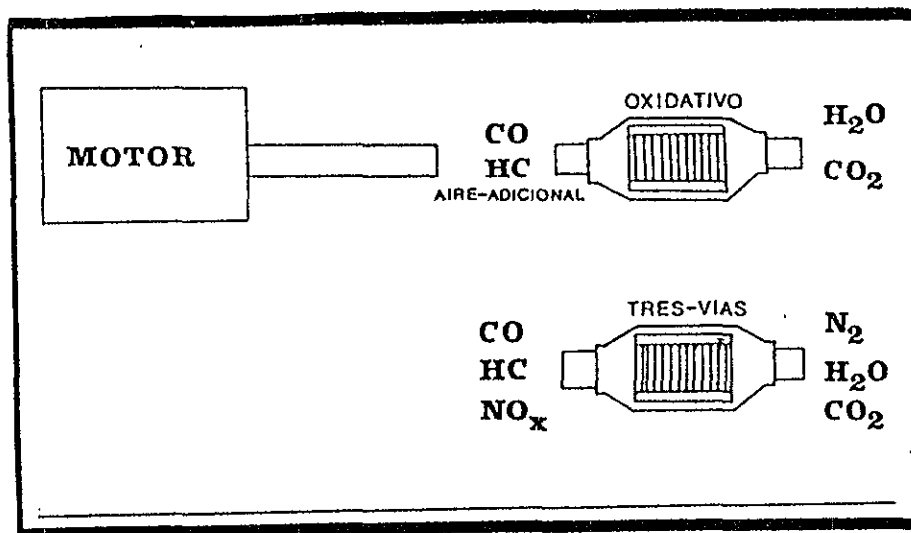
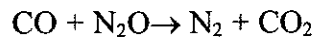
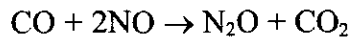
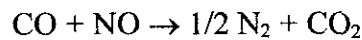


Fig. 14 Representación esquemática del funcionamiento de convertidores catalíticos (20).

La oxidación necesita un aporte extra de oxígeno para convertir los hidrocarburos y el CO en CO₂ y H₂O. En la reducción, los NO_x pierden sus átomos de oxígeno (los cuales se aprovechan en el proceso de oxidación dando como producto final nitrógeno puro (N₂), gas inerte e inofensivo.

La reducción de NO por CO es una de las reacciones catalíticas más importantes que ocurren en los convertidores catalíticos de automóviles para remover NO del escape de la máquina. El rodio es ampliamente reconocido como el componente catalítico más eficiente para promover la reducción de NO a N₂ en los catalizadores de tres vías. Recientemente se ha reconocido la participación de la reacción de N₂O + CO como un paso intermediario de la reacción durante la reacción completa NO + CO. Cho *et al.* (16) observaron la formación de N₂O durante la reacción de NO + CO para la reducción posterior de N₂O por CO en Rh/Al₂O₃ (Rodio/Óxido de alumina) y Rh/CeO₂ (Rodio/Óxido de Cerio) para producir N₂ y CO₂ (41) aunque la contribución cinética de la reacción N₂O + CO a la reacción completa NO + CO debe ser despreciable debido a la lenta tasa de la reacción N₂O + CO.

El esquema de la reacción completa para la reacción de NO-CO indicada por Cho y Shanks involucra las siguientes tres reacciones:



Las principales partes de los convertidores catalíticos modernos son:

Un soporte de cerámica con una gran superficie, esto se logra en base a hacer al material muy poroso, por ejemplo poros finos implican mayor área, pero esto a su vez conlleva a tener un mayor control tanto en el tamaño promedio del poro como en su distribución, poros relativamente pequeños, por ejemplo menos de 5nm pueden taparse fácilmente al depositarse en el catalizador. Aunado a esto debe cumplir que sea inerte, duro, resistente a la ruptura por compresión, estable bajo las condiciones de reacción y regeneración y de bajo costo.

Tres materiales reúnen las características necesarias para ser usadas como un buen soporte, sílica, carbón activado y alúmina, siendo ésta última la más utilizada industrialmente (61).

Los soportes cerámicos pueden tener distintas geometrías, desde esferas, anillos, polvos, etc., hasta los monolitos o panales, que es el tipo de soporte que están usando la mayoría de los convertidores catalíticos automotrices actuales. El monolito tiene paredes fuertes, porosas, con canales paralelos. Esta

estructura promueve la formación de un flujo laminar, lo cual evita que la presión tenga que ser a altas tasas de flujo y sea turbulento.

El soporte se fabrica a partir de un polvo que puede ser incorporado en una mezcla precipitada, o el sustrato puede ser precipitado por sí mismo de una solución en el proceso de manufactura. Substancias como alúmina coloidal o sílica coloidal pueden jugar un doble papel, actuando como agentes que adhieren el catalizador al soporte y como soporte del producto final.

Comúnmente es necesario recubrir la superficie del soporte con un material, para que pueda ser posible fijar la parte activa del catalizador, esta sustancia puede ser alúmina- γ , titania o sílica coloidal, etc. y se aplica como una solución acuosa. En la fig. 15 se muestran los distintos materiales con los que son elaborados tanto la estructura como los recubrimientos.

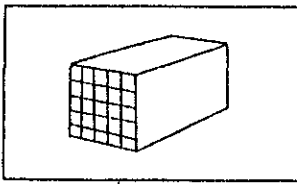
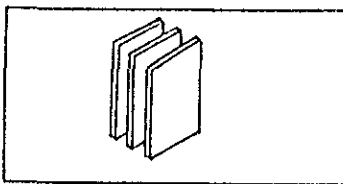
			
α - γ ALUMINA	Al_2O_3	γ -ALUMINA	Al_2O_3
CORDIERITA	$2Mg \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$	TITANIA	TiO_2
MULITA	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	ALUMINATO DE MAGNESIO-ESPINELA	$MgO \cdot MgOAl_2O_3$
CORDIERITA-MULITA	$2MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ $2Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	SILICA	SiO_2
MULITA-TITANIA DE ALUMINIO	$3Al_2O_3 \cdot SiO_2$ $Al_2O_3 \cdot TiO_2$	TITANIA-SILICA	$TiO_2 \cdot SiO_2$
TITANIA	TiO_2	ALUMINA DE TRANSICION	γ - α -ALUMINA
SILICA	SiO_2	ALUMINIO-SILICATO	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$
ESPINELA	$MgO \cdot Al_2O_3$	93% ALUMINA + 7% SILICA	
ZEOLITA	$SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot Na_2O$		
ZIRCONIA	ZrO_2		
ZIRCONIA-ESPINELA	$ZrO_2 \cdot MgO \cdot Al_2O_3$		
CARBURO DE SILICIO	SiC		
NITRURO DE SILICIO	Si_3N_4		
METALICOS	$Fe-Cr-Al-Y$		

Fig. 15 Materiales para la fabricación de monolitos (honey-comb) y recubrimientos (wash-coat) en soportes de convertidores catalíticos (12).

Además se utilizan aditivos metálicos que actúan como promotores y/o estabilizadores. Un promotor se define como una sustancia que se añade durante la preparación de un catalizador, con el objeto de mejorar la actividad o selectividad o estabilizar al agente catalítico para prolongar su vida; el promotor

está presente en cantidades muy pequeñas y tiene por sí mismo muy poca actividad. Se ha encontrado que la adición de Al_2O_3 (el CaO y el K_2O también actúan como promotores) evita la reducción (por sinterización) en el área superficial durante el uso del catalizador, y proporciona una mayor actividad durante un tiempo más prolongado. Se cree además que algunos promotores aumentan el número de centros activos, haciendo que la superficie catalítica sea más activa (63). En cuanto a los estabilizadores como el cerio, etc. sirven para evitar que el rodio sufra desactivación por la exposición a altas temperaturas de operación en los convertidores, esto se ha atribuido a una interacción fuerte entre $\text{Rh}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Y por último, se usan metales del grupo del platino (paladio, rodio, rutenio), solos o combinados, siendo estos los elementos catalíticos primarios, los cuales son fijados en el soporte.

El platino y el paladio, han sido reportados como muy eficientes para la oxidación de CO_2 y de los HC residuales. Por otro lado el rodio y el rutenio han sido altamente recomendados para efectuar la descomposición, en una atmósfera reductora, de los NO_x en N_2 y O_2 . El CO_2 residual actúa como reductor de los NO_x en presencia de rodio o rutenio, efectuando una reacción de óxido-reducción. Los productos obtenidos son CO_2 y N_2 .

Las temperaturas para las reacciones de oxidación catalítica para los HC son entre 280 y 400°C y para el CO entre 200 y 250°C .

Debido a los problemas de envenenamiento de los catalizadores, el combustible que se usa debe estar libre de plomo o por lo menos se deben remover las partículas de plomo antes de que los gases de escape pasen a través del catalizador.

Niveles de plomo inferiores a 3 mg/l no causan la desactivación de los catalizadores de platino y rodio en ninguna condición de manejo.

Los catalizadores de tres vías pueden mejorarse con respecto a la estabilidad térmica al:

1) modificar el sistema de superficie del soporte para eliminar la pérdida de este en temperaturas de operación altas

2) estabilización del mismo para minimizar la interacción rodio/gamma-alúmina y

3) promoción de la actividad del rodio por la incorporación de aditivos base metal térmicamente estables (14) y en cuanto al envenenamiento sustituyendo el plomo por otros aditivos, como los compuestos oxigenados (alcoholes y éteres) que también aumentan la resistencia a la detonación de la gasolina u octanaje.

Un catalizador puede perder su actividad por la temperatura, ya que cuando los gases de escape llegan a alcanzar 1100°C el soporte de cerámica puede fundirse (sinterización), disminuyendo drásticamente

la superficie catalítica activa. Si la temperatura supera durante mucho tiempo los 1300°C puede llegar a fundirse totalmente la rejilla cerámica.

3.1.3. Manufactura de los Convertidores Catalíticos

El soporte, generalmente poroso, se pone en contacto con una solución acuosa de uno o más compuestos metálicos. El soporte se seca, y el catalizador se activa cuando es calentado para calcinarlo o descomponerlo, después sigue una reducción si se desea un catalizador metálico. El tamaño y la forma de las partículas del catalizador son las mismas que el soporte. Este proceso es económicamente deseable porque esparce el metal en partículas finamente divididas. El metal noble está presente en 1% en peso o menos del total, y esto hace un uso máximo de un ingrediente muy caro. Este proceso es llamado impregnación.

En el motor, el pistón empuja en su movimiento ascendente los gases calientes residuales de la combustión hacia la válvula de escape. Por ella salen de la cámara de combustión al tubo de escape, y ahí se encuentran con el catalizador de tres vías. Cuando los gases llegan a las superficies activas dentro de las celdillas cerámicas, se desencadenan casi simultáneamente dos procesos químicamente opuestos: una oxidación y una reducción. Antes, los átomos de platino disminuyen la energía de activación de la reacción acelerándola.

La relación aire/gasolina normalizada constituye el llamado Coeficiente Lambda. Cuando su valor es uno, teóricamente significa que todos los átomos de oxígeno presentes en la mezcla han participado en la combustión, y que quedan pocas moléculas de CO, HC y NOx.

La figura 16 muestra el funcionamiento de un convertidor catalítico de tres vías como función de la relación aire-combustible. Puede observarse que solo cuando la mezcla es estequiométrica se comporta como de tres vías, reduciendo los tres contaminantes, si hay exceso de aire no reduce el NOx, si falta aire no oxida el CO ni los HC.

Por eso, el buen funcionamiento del catalizador exige del motor una intervención activa en los procesos de combustión, que tenga en cuenta todos los parámetros secundarios (temperatura exterior, temperatura del motor, presión atmosférica, humedad, velocidad, posición del acelerador, etc.). Y esto solo es posible con ayuda de un complicado sistema electrónico de regulación del encendido y de la inyección, que influye sobre todas las variables para alcanzar el imprescindible valor Lambda igual a uno.

La sonda lambda es uno de los elementos más importantes de este circuito electrónico. Se trata de un sofisticado sensor que produce una señal eléctrica cuando detecta O_2 en el gas de escape, por ínfima que sea la cantidad. Cuando ese es el caso, quiere decir que la combustión no ha sido óptima, de forma que el procesador del sistema debe modificar las proporciones de la mezcla carburante o los valores del encendido.

Las figuras 16 y 17 muestran las emisiones de un motor sin catalizador, cuando la mezcla aire/carburante tiene un valor Lambda igual a uno las emisiones de los tres contaminantes son bajas. A la izquierda y a la derecha de la ventana de máxima eficacia, la combustión en el interior del motor ya no es la más apropiada. Los motores que funcionan con coeficientes Lambda mayores a 1.4 y los motores de mezcla pobre (mucho aire, poco carburante), son muy económicos, pero tienen el inconveniente de que la concentración de NO_x aumenta bruscamente. Empobreciendo aún más la mezcla, se consigue reducir la cantidad de NO_x , pero en cambio aumentan los HC. En este caso, para desintoxicar los motores de mezcla pobre, hay que utilizar un catalizador de oxidación que termine de quemar los hidrocarburos. Este tipo de catalizadores no llevan regulación electrónica, ni alcanzan el grado de purificación de los catalizadores de tres vías.

A la izquierda de la ventana de máxima eficacia, con valores Lambda menores de uno, se ve un claro ascenso de la concentración de las sustancias contaminantes del grupo de los HC y del CO. En este caso no se han quemado todas las moléculas de carburante, por lo que la mezcla era excesivamente rica. Una mezcla rica es necesaria para arrancar mejor el motor, pero también implica un mayor consumo de combustibles y más contaminantes.

La catálisis sólo se produce con temperaturas superiores a los $200^\circ C$. Por eso los ingenieros se han ocupado de que el catalizador alcance su temperatura normal de trabajo lo antes posible, generalmente se tarda entre sesenta y noventa segundos para lograr una catálisis efectiva.

Un catalizador completamente nuevo es capaz de eliminar el 98% de los gases nocivos. Con el tiempo, el envejecimiento causado por el uso reduce su efectividad hasta el 90 o 95%. En los controles de calidad antes de salir de la fábrica, los catalizadores deben demostrar que incluso después de 80 000 km. seguirán manteniéndose dentro de los límites. En general, se puede afirmar que los catalizadores duran bastante, siempre que se utilicen adecuadamente y no sufran daños.

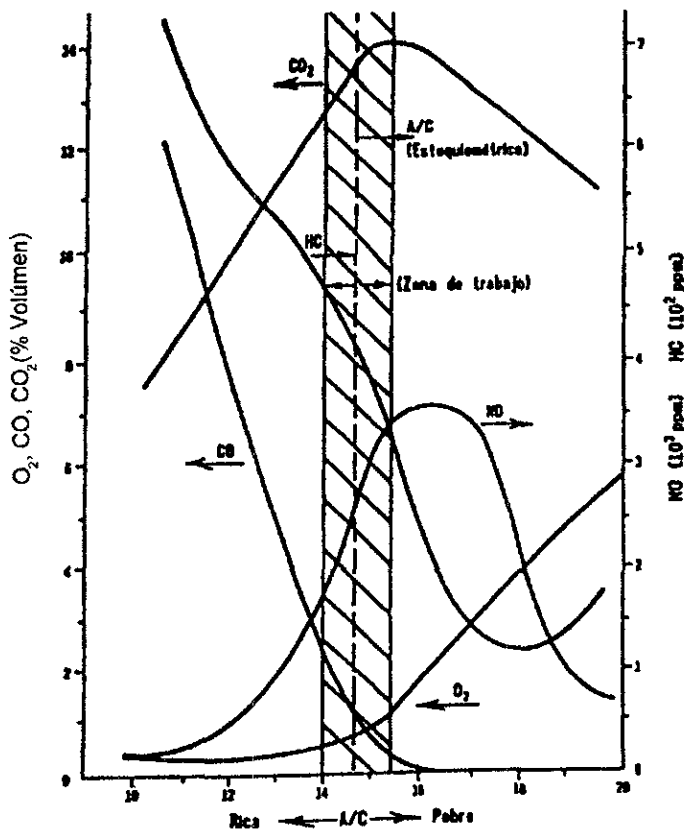


Fig. 16 Emisión de contaminantes por un motor de gasolina, para diferentes valores de la relación aire/combustible introducida por el carburador

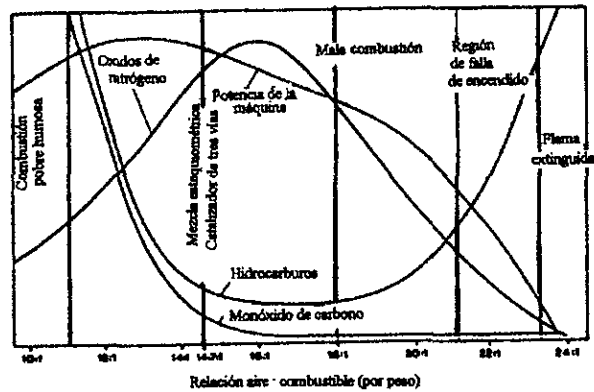


Fig. 17 Emisión de contaminantes por una máquina de petróleo

La catálisis sólo se produce con temperaturas superiores a los 200°C. Por eso los ingenieros se han ocupado de que el catalizador alcance su temperatura normal de trabajo lo antes posible, generalmente se tarda entre sesenta y noventa segundos para lograr una catálisis efectiva.

Un catalizador completamente nuevo es capaz de eliminar el 98% de los gases nocivos. Con el tiempo, el envejecimiento causado por el uso reduce su efectividad hasta el 90 o 95%. En los controles de calidad antes de salir de la fábrica, los catalizadores deben demostrar que incluso después de 80 000 km. seguirán manteniéndose dentro de los límites. En general, se puede afirmar que los catalizadores duran bastante, siempre que se utilicen adecuadamente y no sufran daños.

Un problema a resolver cuando se acopla un catalizador a un motor es que supone un cuello de botella para los gases de escape. La presión del atasco impide que los gases puedan fluir con la suficiente rapidez hacia el exterior. En el peor de los casos, la sobrepresión puede llegar hasta el cilindro, impidiendo una combustión óptima y reduciendo la potencia del motor. Actualmente se construyen catalizadores a la

medida de casi todos los motores. El catalizador constituye un elemento activo tanto en el circuito de admisión, compresión y combustión, como en el escape. Se puede incluso decir que los más modernos motores no podrían alcanzar su nivel óptimo sin el catalizador. La presión del escape está definida de tal manera que se forma una columna oscilante de gas entre el motor y el catalizador: los contaminantes ya no se expulsan al ritmo de los cuatro tiempos del pistón, sino que fluyen casi continuamente.

3.1.4. Experimentos realizados

En el Instituto de Física de la UNAM Se colaboró en la caracterización de algunos catalizadores patentados por los Drs. Octavio Novaro Peñalosa del IFUNAM y Tessy López y Ricardo Gómez de la UAM-I, estas medidas se realizaron bajo la dirección del Dr. Héctor Riveros Rotge y M. en C. Pilar Ovalle Marroquín utilizando el espectrofotómetro de infrarrojo Buck Scientific modelo 500.

Utilizando las absorciones características en el infrarrojo de los gases de interés en el estudio de la contaminación atmosférica y de emisiones vehiculares, se implementó el uso de la espectroscopía de infrarrojo (IR) para monitorear la capacidad de óxido-reducción en catalizadores con respecto a la temperatura de funcionamiento.

Se usó una celda de gases de 1.5 m de trayecto óptico efectivo del espectrofotómetro de infrarrojo para realizar las pruebas. Se inyectaba 1% de oxígeno con un flujo entre 12-15 ml/min, administrado con una bomba de aire Meiko Hi-Tech 7500 y una mezcla de un tanque de CO, óxido nítrico, y nitrógeno balanceado, con un flujo entre 120-150 ml/min.

Las muestras se calentaban previamente para eliminar el agua que adsorbían.

El método consistió en utilizar un flujo constante de gas de composición y concentración similares a la de las emisiones vehiculares promedio (CO 0.998%, NO 994 ppm, N₂ balanceado, O₂ 1% y H₂O a saturación) y hacerla pasar por un dispositivo que contenía 4g del catalizador pulverizado a una temperatura seleccionada (20, 100, 200, 300, y 350°C) en orden creciente y algunos en orden decreciente. Se obtuvieron espectros de infrarrojo del gas de referencia antes de hacerlo pasar por el catalizador y después de pasar por éste.

Se midieron diferentes muestras de convertidores catalíticos de 2 y de 3 vías comerciales y los catalizadores de rutenio y platino de los Drs. Octavio Novaro, Tessy López y Ricardo Gómez, en los cuales se observan resultados prometedores en la oxidación del CO y la reducción de NO.

De la relación IR de la muestra/ IR del gas de referencia se obtuvo un espectro en % de transmitancia en el cual se pueden observar las absorciones características de las sustancias que fueron

consumidas y producidas durante el proceso catalítico, lo cual permitió correlacionar la actividad catalítica con la temperatura de funcionamiento para encontrar las condiciones de mayor eficiencia del proceso para cada catalizador.

También se midieron emisiones de vehículos con y sin catalizador, en frío y a temperatura de trabajo, se identificaron gases contaminantes como CO, NO, NO₂ y algunos hidrocarburos.

Para medir escapes de automóviles se siguió el siguiente procedimiento:

- 1) Toma de muestra del escape
- 2) Se llenó la celda de gases
- 3) Se tomaron espectro de IR de la muestra y del aire atmosférico, como referencia, y de la relación $\text{Muestra/Referencia} = \text{espectro \% Transmitancia}$, y la interpretación fué cualitativa.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

- HEU-1 (Temperatura ascendente)

A 20°C absorbe agua (1500 cm⁻¹). Se libera poco CO₂ (2300-2380 cm⁻¹) y se consume óxido nítrico a 1800-1950 cm⁻¹.

A 100°C se libera más CO₂ y se inicia la aparición de NO.

A 200°C se inicia la transformación de CO (2050-2200 cm⁻¹) a CO₂ y se produce óxido nítrico.

A 300°C y 350°C la oxidación de CO a CO₂ es máxima, así como la producción de NO.

- HEU-2 (Temperatura ascendente)

A 20°C no hay cambio.

A 100°C se libera CO₂, inicia el consumo de CO (1800-1950 cm⁻¹) hay liberación de agua y se consumen componentes del aire con absorción en 1250-800 cm⁻¹.

A 200°C se inicia la transformación de CO a CO₂, se inicia además la aparición de NO y persiste la absorción en 1250-800 cm⁻¹.

A 300°C la oxidación de CO a CO₂ es máxima, ya no hay liberación de agua, ni absorción en el intervalo de 1250-800 cm⁻¹ y la producción de NO es máxima.

- RuPt 300 (Temperatura ascendente)

A 20°C no hay cambios. Solo se observa liberación de agua.

A 100°C libera más agua que a 20°C.

A 200°C se libera más agua que a 100°C y se libera CO₂ en pequeña cantidad.

A 300°C se alcanza la mayor actividad de oxidación de CO a CO₂; se produce N₂O y se alcanza la mayor liberación de agua.

- RuPt 350 (Temperatura descendente)

A 350°C se produce la mayor oxidación de CO a CO₂, con liberación de agua en cantidades grandes; se produce N₂O y se absorben componentes del aire con absorción en la región 1250-800 cm⁻¹ y hay la aparición de una banda fuerte en 800-600 cm⁻¹.

A 300°C el comportamiento es el mismo que a 350°C pero la actividad de transformación es menor.

A 200°C no hay actividad de oxidación.

- TLG 3-300 (Temperatura ascendente sin aire)

A 20°C hay producción de CO₂ y de óxido nitroso.

A 100°C hay mayor producción de CO₂, menor producción de óxido nitroso y aparece óxido nítrico, además se empieza a consumir CO.

A 200°C se produce más CO₂, hay menor producción de óxido nitroso, se continua consumiendo CO y se produce más óxido nítrico.

A 300°C se consume más CO y hay la mayor producción de CO₂ y NO.

- TLG 3 (Temperatura ascendente)

Se observa a 20°C liberación en cantidades muy pequeñas de CO₂. Se consumen componentes del aire en grandes cantidades entre 800-1200 cm⁻¹ y se producen sustancias con absorción a 650 cm⁻¹.

A 100°C se libera más CO₂, también se inicia la producción de óxido nitroso y de óxido nítrico aunque aquí se confunde con la banda del agua alrededor de 1500 cm⁻¹, se mantiene el comportamiento anterior entre 1250-600 cm⁻¹.

A 200°C se produce más CO₂, también se produce óxido nitroso, óxido nítrico, NO₂ a 1580-1640 cm⁻¹. Se consumen los mismos compuestos que absorben en la banda de 800-1200 cm⁻¹ y se produce una mayor banda a 650cm⁻¹.

A 300°C no varía la cantidad de CO₂ producido con respecto a 200°C. Se consume más CO, teniendo su mayor actividad catalítica TLG 3 a esta temperatura y se mantiene el comportamiento inicial entre 1250 y 600 cm⁻¹.

- Ru 300 (Temperatura ascendente)

A 20, 100 y 200°C no se observan cambios relevantes, excepto la liberación de agua en cantidades crecientes y liberación de compuestos con bandas de absorción a 980-600 cm⁻¹

A 300°C existe una pequeña liberación de CO₂ y se consumen NO y otras sustancias del aire que absorben entre 2100-1900 y 800-600 cm⁻¹, se consume también una gran cantidad de agua y se producen compuestos con bandas de absorción entre 1300 y 750 cm⁻¹.

En la mayoría de los casos se produce CO₂ y se consume CO desde 200°C, teniendo su óptimo entre 300-350°C.

Estos catalizadores son muy higroscópicos porque a temperatura ambiente absorben agua.

Se producen sustancias, las cuales no se lograron identificar, que absorben de 750 a 600 cm⁻¹.

Se consumen sustancias del aire con bandas de absorción en la región de 750-1200 cm⁻¹.

Se produce óxido nítrico y nítrico desde los 200°C y el óptimo está en 300°C o más.

El HEU 1 temperatura ascendente y TLG 300 temperatura ascendente sin aire consumen o adsorben óxido nítrico a temperatura ambiente.

En RU 300 temperatura ascendente, a 300°C se consume o se adsorbe óxido nítrico.

En general estos catalizadores son buenos oxidantes de CO y a la vez del N₂ del aire.

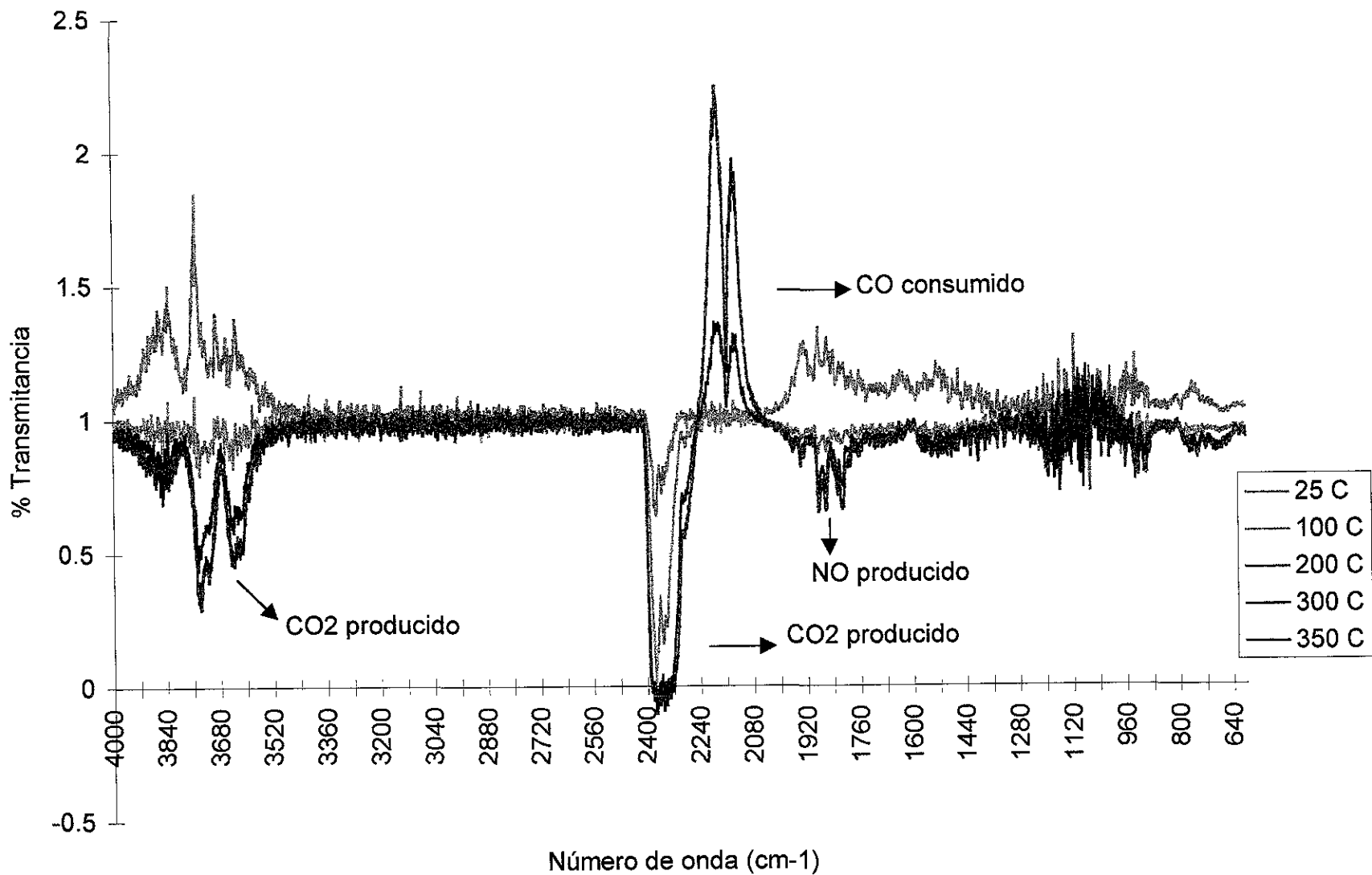


Fig. 18 Catalizador HEU-1 (Temperatura ascendente)

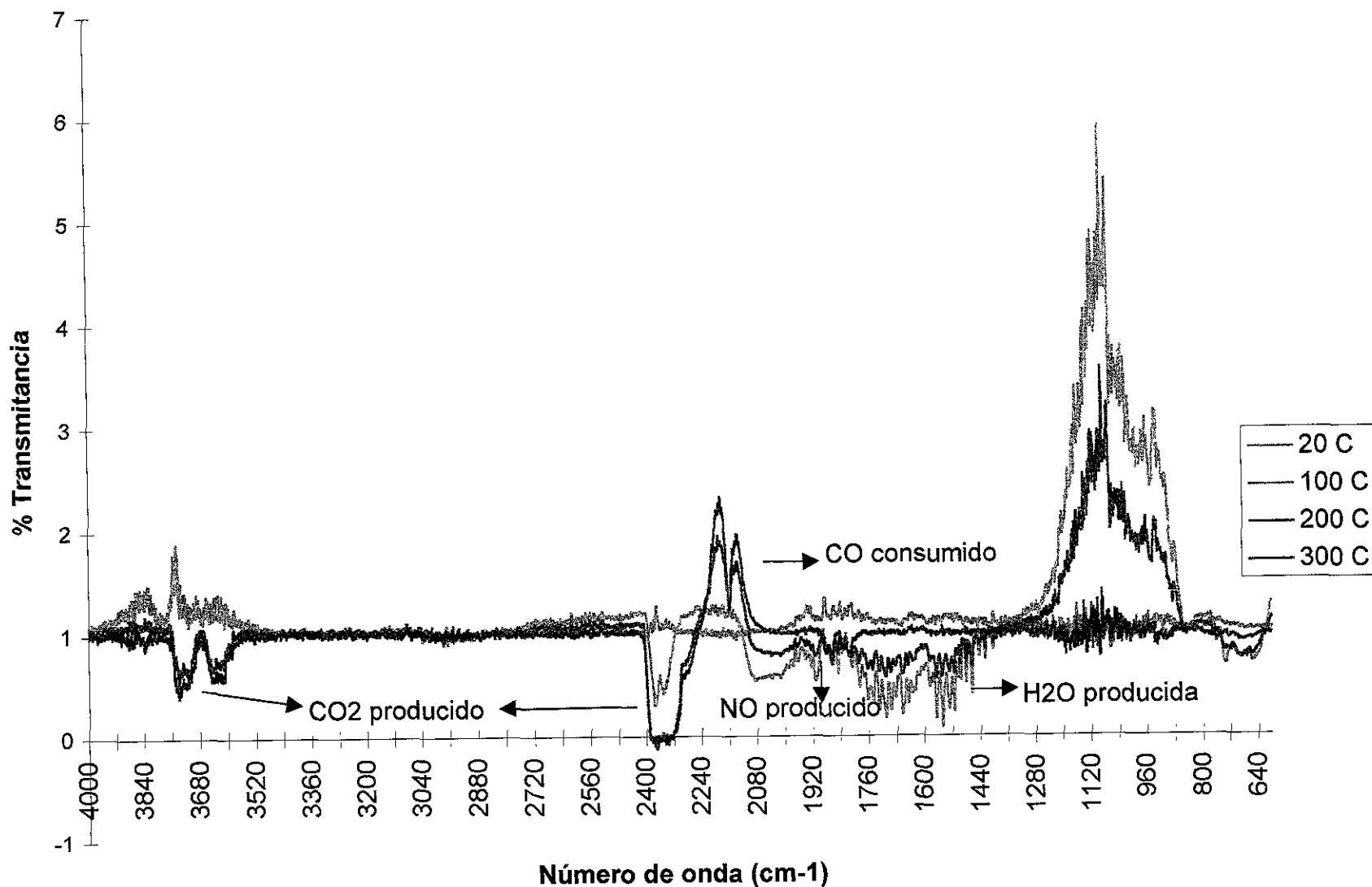


Fig. 19 Catalizador HEU-2 (Temperatura ascendente)

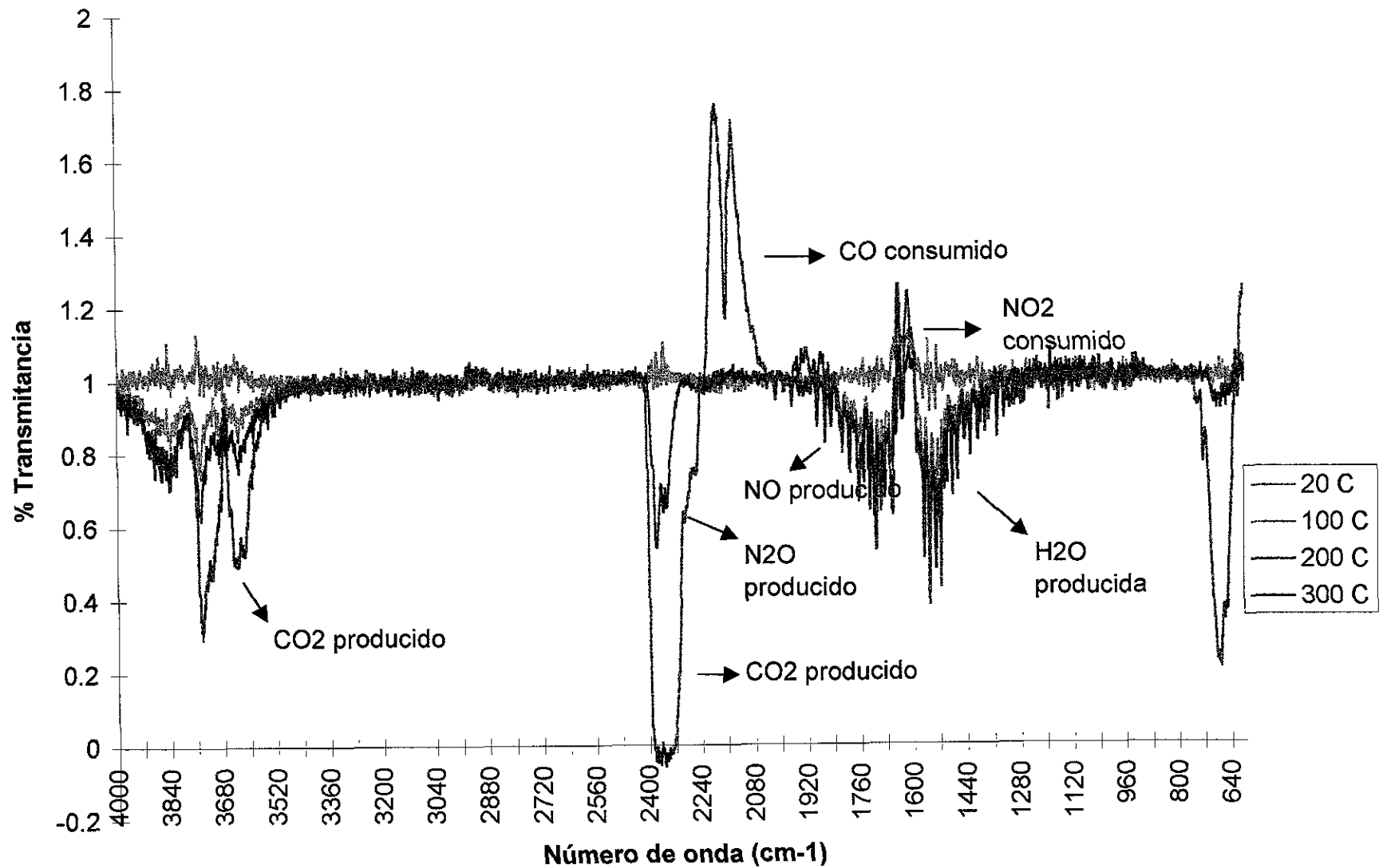


Fig. 20 Catalizador RuPt 300 (Temperatura ascendente)

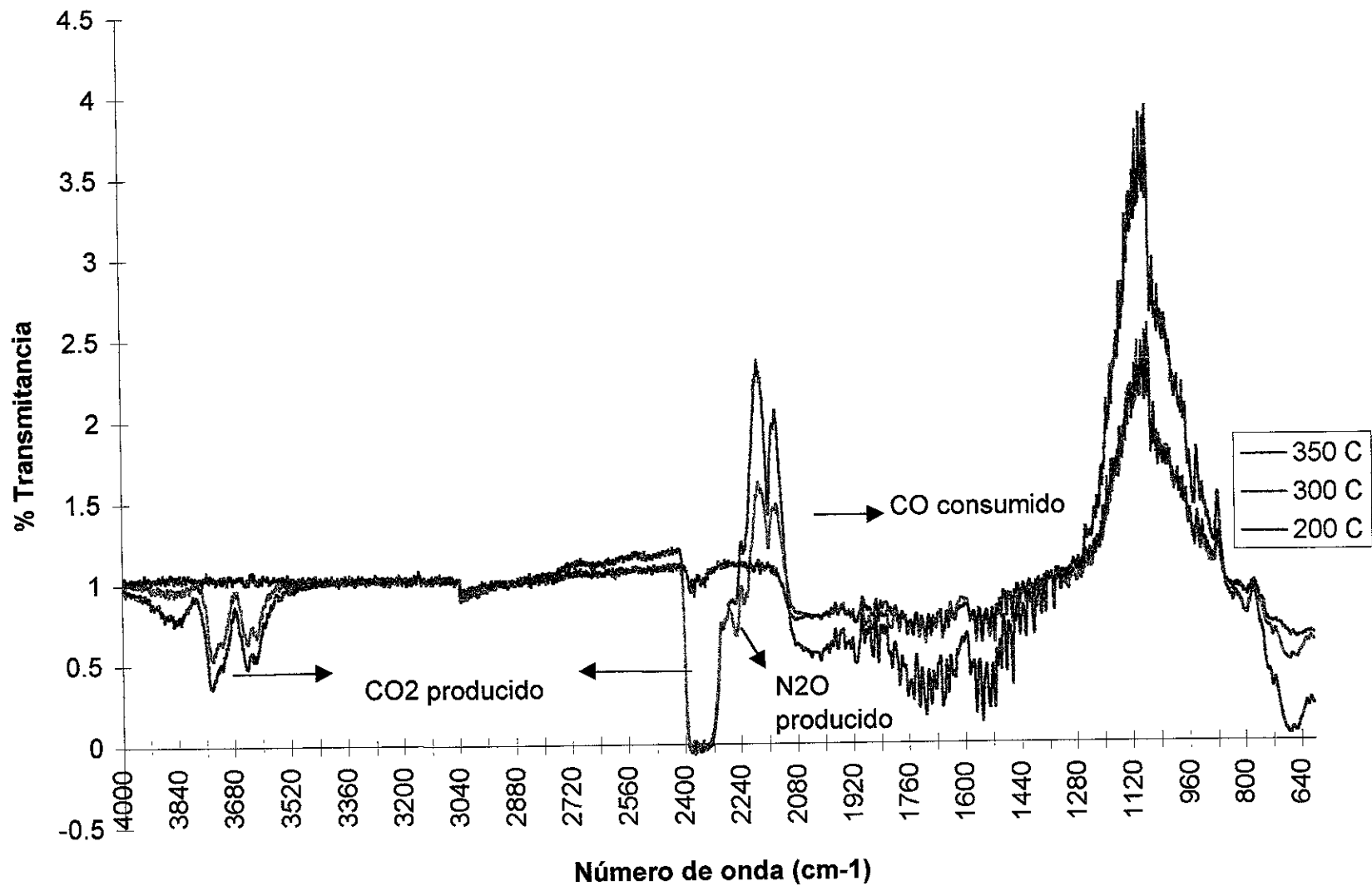


Fig. 20 Catalizador RUPt 350 (Temperatura ascendente)

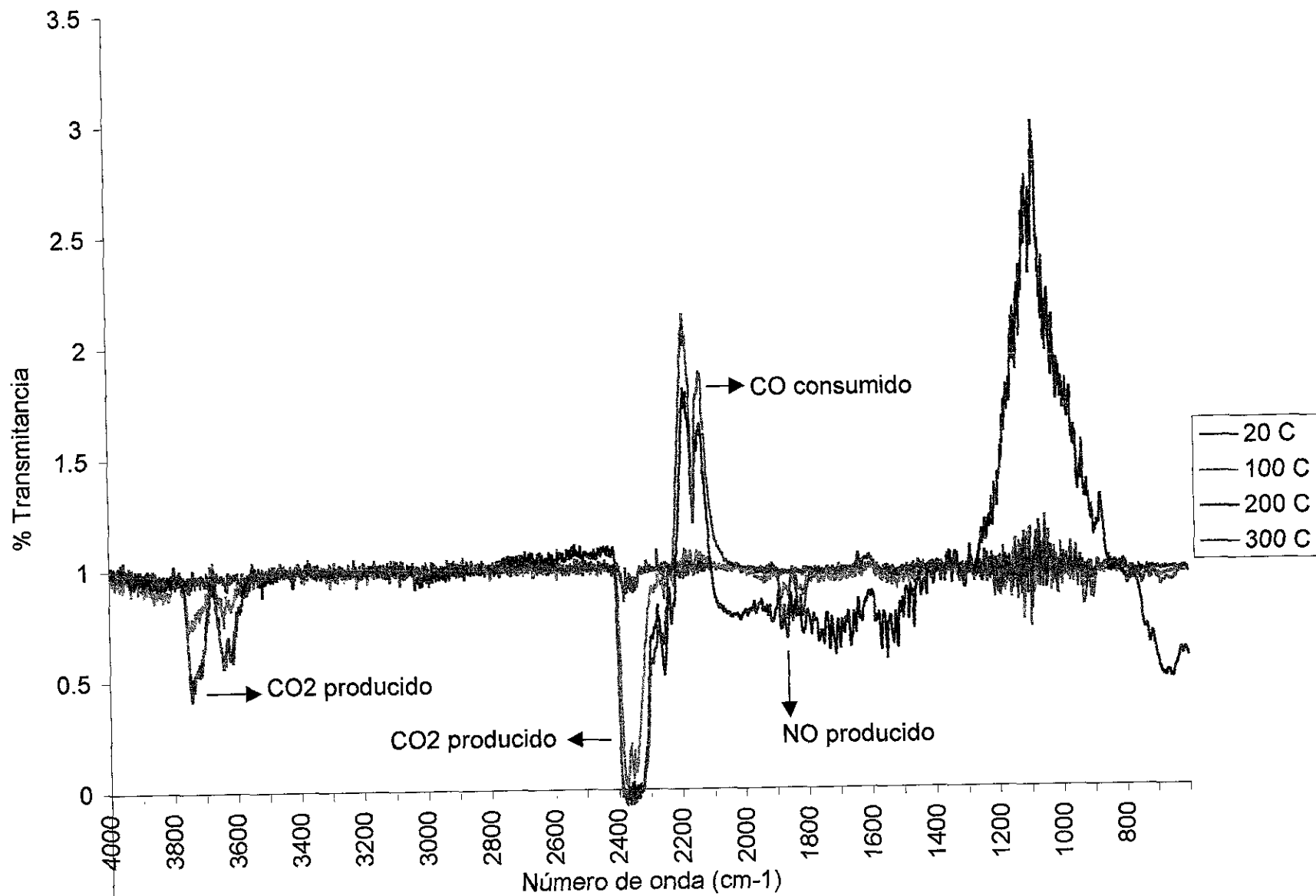


Fig. 22 Catalizador TLG3-300 (Temperatura ascendente sin aire)

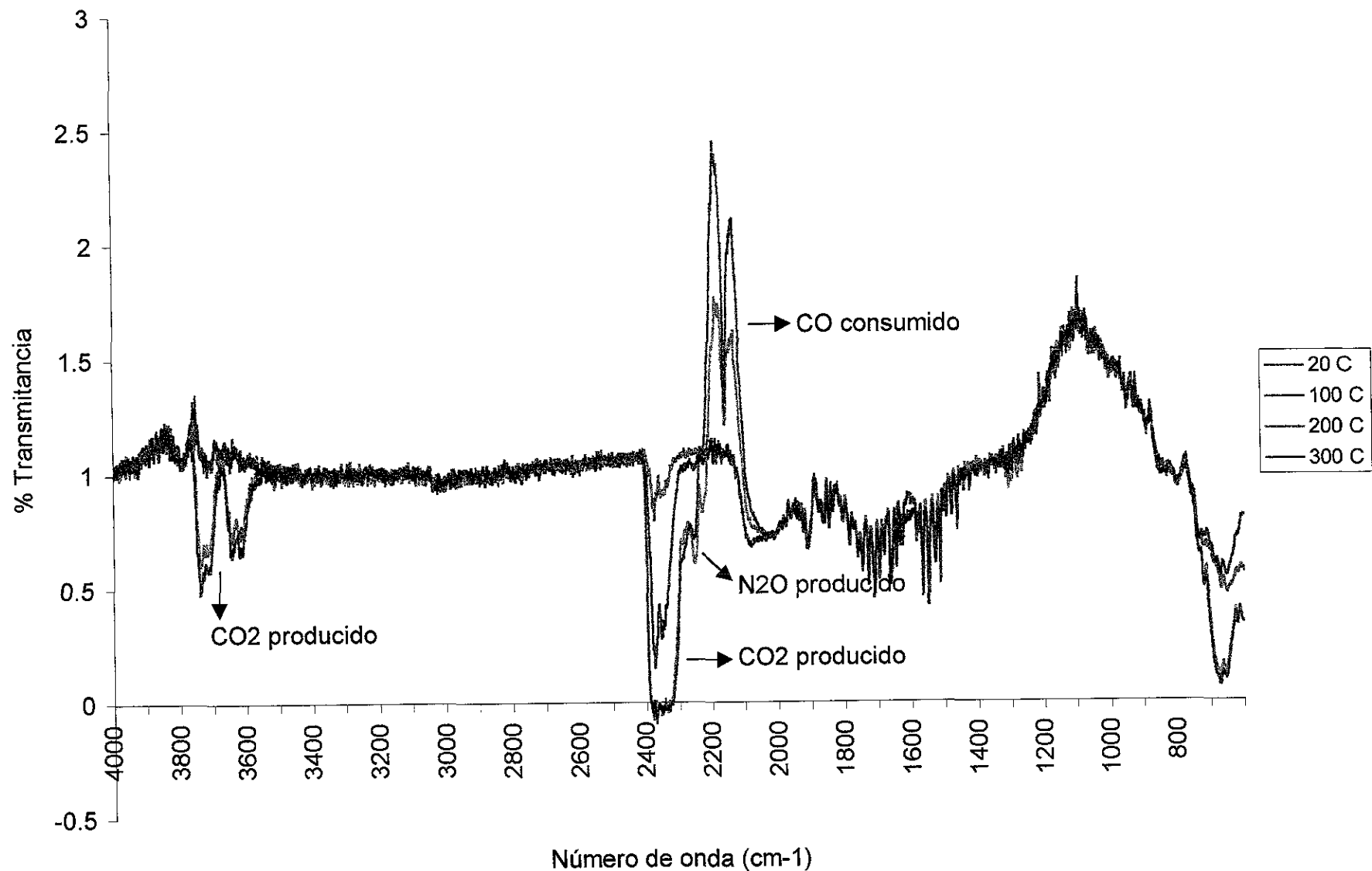


Fig. 23 Catalizador TLG3 (Temperatura ascendente)

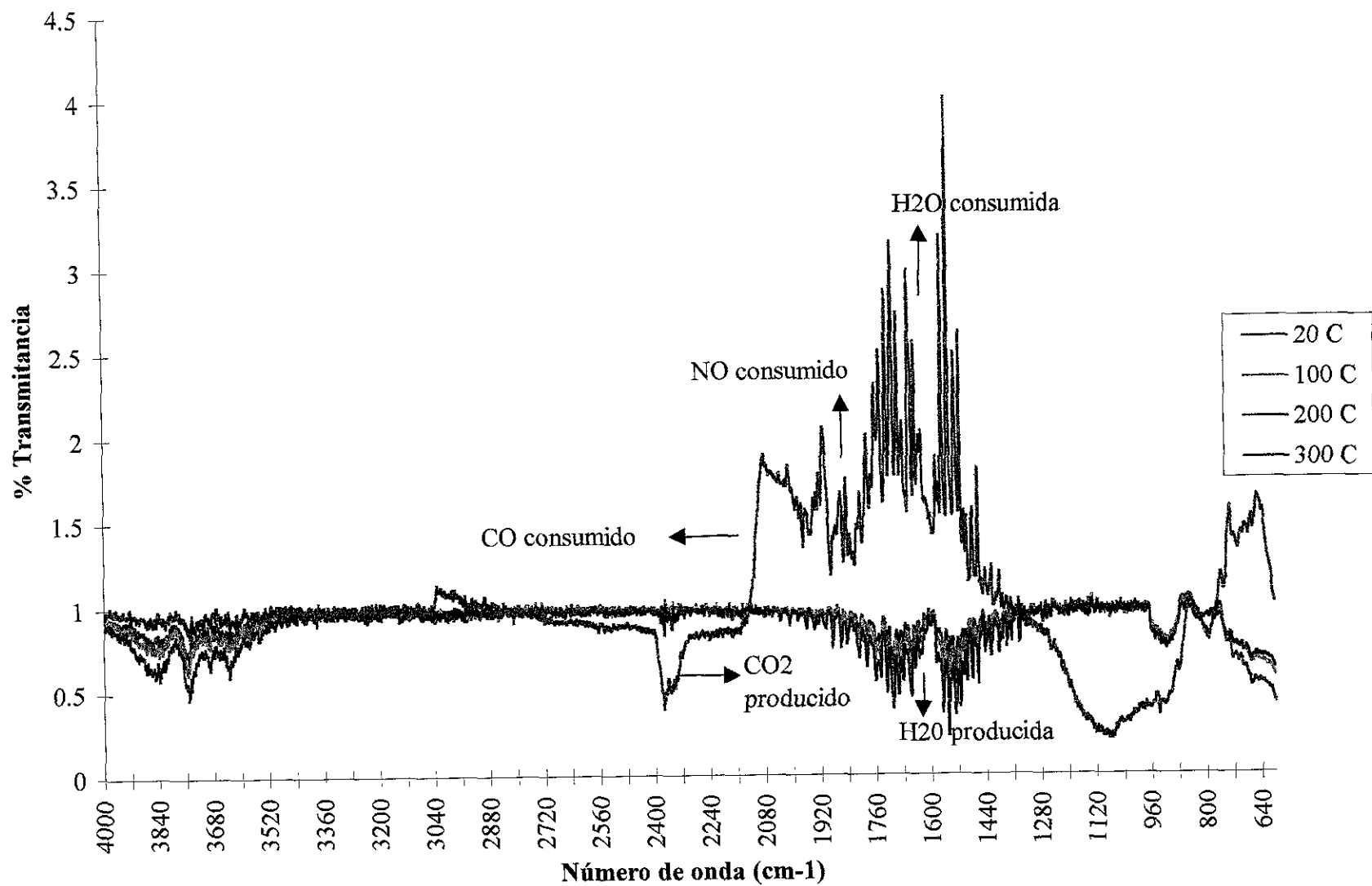


Fig. 24 Catalizador RU-300 (Temperatura ascendente)

El ozono estratosférico se está destruyendo debido a la acción del hombre, con graves consecuencias en los ecosistemas. La comunidad internacional está tomando medidas para combatir este problema.

El ozono troposférico se ha convertido en un problema global de contaminación especialmente en las grandes metrópolis del mundo. Es producido por NO_x y HC que son expulsados por vehículos e industrias y las reacciones químicas que se dan en presencia de luz solar.

El ozono es un compuesto fitotóxico, produce daño en la vegetación midiéndose una reducción en el crecimiento y en la reproducción, y daño foliar visible.

En mamíferos (cobayos, ratones, conejos, gatos, perros, monos y humanos), los efectos tóxicos del ozono se manifiestan principalmente en el aparato respiratorio, ya que es aquí donde los contaminantes se pueden absorber y transferir a la corriente sanguínea. No se sabe a ciencia cierta los daños a largo plazo que causan los niveles de contaminación actuales.

Las membranas celulares son los sitios principales de toxicidad y sugieren que el daño que causa el ozono es inducido parcialmente por radicales libres.

El IMECA 100 puede llegar a producir efectos en la salud de las personas, más allá de molestias en personas sensibles como indican los estándares mexicanos.

Debido al gran consumo de combustibles derivados del petróleo, la ZMCM enfrenta graves problemas de contaminación, ocupando el consumo de gasolina el primer lugar. Y es el ozono el contaminante que rebasa con mayor frecuencia las normas mexicanas de contaminación siendo el único por el cual se ha implementado el Plan de Contingencias Ambientales. El pico de ozono se alcanza entre las 11 y las 15:00 horas.

En orden de importancia, las principales fuentes emisoras de NO_x y HC son: el transporte y la industria.

Los automóviles en la ZMCM tienen los factores de emisión muy altos, sobre todo aquellos que no tienen mantenimiento adecuado y carecen de equipo de control de emisiones.

Se requiere un transporte colectivo más eficiente en la ZMCM que permita un mayor número de viajes-persona y desaliente el uso de los vehículos particulares, utilizando éstos solamente en casos necesarios y distancias largas de recorrido.

Es necesario el escalonamiento o la flexibilidad de las horas de trabajo para que el uso del transporte público se distribuya de manera uniforme a lo largo del día. Además, se podría hacer una diversificación de actividades y de viviendas en toda la ZMCM para reducir las necesidades de transporte y mejorar las vías urbanas y la organización del tránsito vial.

una zona tropical, esto origina una alta incidencia de radiación solar que favorece su formación, aunado a una menor concentración de oxígeno que origina una pobre eficiencia en los procesos de combustión. Para suplir esta deficiencia en oxígeno se debe favorecer una mejor relación aire:combustible por medio de una buena afinación del vehículo.

La RAMA es la encargada de medir los contaminantes en la ZMCM y el IMECA describe numéricamente los niveles de contaminación. Los datos de esta red son confiables tanto por el equipo utilizado como por la distribución de las estaciones de monitoreo. Pero la gran cantidad de datos obtenidos hace difícil la interpretación para poder hacer inferencias acerca del comportamiento y predicción de los contaminantes.

El IMECA comparado con el índice de Ott y Thom muestra descripciones muy diferentes para los mismos niveles de contaminación del aire. Por ejemplo, el índice de 101-200 nos habla en la descripción IMECA de un aumento de molestias en personas sensibles mientras que Ott y Thom dicen malo para la salud, de 201-300 el IMECA se refiere a aparición de ligeras molestias en la población en general y Ott y Thom dicen peligroso. De 301-500 el IMECA habla de aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población sana y Ott y Thom dicen peligroso. Por esta razón el IMECA debe de ser reevaluado y hacerlo más estricto en sus descripciones. Este índice muestra su poca confiabilidad ya que según algunos estudios, los efectos producidos por las concentraciones del IMECA son más graves o diferentes a las descripciones que da este índice.

Entre los sistemas meteorológicos que favorecen la acumulación de contaminantes están: el sistema anticiclónico de invierno, donde no existen movimientos horizontales de aire; el sistema anticiclónico de verano hace que los vientos incidan débiles y del noreste y este dirigidos hacia el oeste y suroeste permitiendo la acumulación de contaminantes en estas zonas, el sistema de alta presión en superficie favorece el desplazamiento de aire frío al Valle de México y su estratificación, acumulándose los contaminantes, las inversiones térmicas inhiben los movimientos atmosféricos tanto horizontal como verticalmente, dando lugar al estancamiento de contaminantes.

La altura de la capa de mezcla nos habla del nivel superior para la dispersión de la contaminación del aire, cuando esta es demasiado baja (menos de 50m.) la contaminación se concentra.

El efecto de “isla de calor” produce un sistema circulatorio de los contaminantes por la variación de temperatura sobre la ciudad.

La concentración del 25% de la población del país se encuentra en la ZMCM, esto la hace una de las metrópolis más grandes del mundo con 42 mil industrias y 3 000 000 de automóviles, dando lugar a un desarrollo ambientalmente desequilibrado.

El viento y las lluvias, originados por perturbaciones térmicas y mecánicas, ocasionan la difusión de los contaminantes y el lavado de la atmósfera.

Resulta difícil dar soluciones definitivas para el problema de contaminación por ozono en la ZMCM, debido a la falta de concientización de la población y de autoridades o instituciones responsables del daño ambiental que se está causando.

Debe detenerse el crecimiento demográfico en la ZMCM, descentralizando las actividades económicas y políticas del país. Y tener un uso del suelo controlado para evitar un crecimiento excesivo, buscando otras alternativas regionales de crecimiento y desarrollo.

Predecir la contaminación en la Ciudad de México a partir de un modelo (biológico, físico, químico o matemático), sería un gran avance en el control de la contaminación.

Los catalizadores de oxidación no pueden reducir los NOx, solamente eliminan el CO y HC. El convertidor catalítico que tiene más funciones catalíticas es el de tres vías ya que reduce los NOx y oxida el CO y los HC al mismo tiempo, pudiendo eliminar el 98% de los gases nocivos.

Se necesita una relación aire:combustible de 14.5:1 controlada por la sonda lambda, un soporte cerámico en forma de monolito o panal generalmente de alúmina con canales paralelos y poros mayores de 5 nm; aditivos metálicos que prolongan la vida del agente catalítico, además de los catalizadores y temperaturas de reacción de 200-400°C.

El parque vehicular en la ZMCM debe renovarse ya que los vehículos de mayor antigüedad no tienen convertidores catalíticos, además de encontrarse el motor en malas condiciones. Esta medida es poco viable por la situación económica del país, siendo difícil la adquisición de un vehículo nuevo. El gobierno podría ayudar a resolver esta situación con préstamos a bajo interés, tenencias menores, eliminando los aranceles de vehículos de procedencia extranjera, etc. También podría crearse un programa de préstamos a una tasa baja de interés para la introducción de tecnologías anticontaminantes. Además de dar beneficios fiscales ya que para las industrias la inversión de capital en equipos para prevenir la contaminación es una carga bastante pesada.

Es necesario incrementar la infraestructura vial y los recursos humanos y materiales para ejercer una vigilancia estricta de las fuentes emisoras. Además de evitar fugas evaporativas cuidando el mantenimiento del motor y las juntas, instalando válvulas VPC, cerrando perfectamente el tapón del tanque de gasolina y con placas de carbón activado. También podría mejorarse la calidad de los combustibles.

Las medidas para combatir la contaminación, como la verificación vehicular, no han funcionado debido a que el propósito de los conductores de la ZMCM es aprobarla para poder seguir utilizando sus vehículos y esto los lleva a tener que cometer fraudes o cambiar el motor de su automóvil

en las auditorías ambientales a las industrias, etc. El programa “hoy no circula” promovió la adquisición de un vehículo adicional más antiguo y contaminante.

Antes de tomar decisiones para reducir la contaminación es necesario considerar los costos económicos, sociales y humanos de las medidas a tomar.

EST. ... REBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Referencias

1. Avol, Edward L., William S. Linn, Theodore G. Venet, Deborah A. Shamoo, y Jack D. Hackney. (1984) Comparative Respiratory Effects of Ozone and Ambient Oxidant Pollution Exposure During Heavy Exercise. *Japca.* **34**:804-809.
2. Bazán Navarrete, Gerardo. (1992) Energía y Medio Ambiente. *Dynamis. Boletín de energía de la UNAM.* Año 4. No.1 Enero-Dic.
3. Beaton, S.P., G.A. Bishop y D.H. Stedman. (1992) Emission Characteristics of Mexico City Vehicles. *J. Air Waste Manage. Assoc.* **42**:1424-1429.
4. Benolol Garrido, M. (1995) Análisis del Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA). Tesis. Facultad de Ciencias. UNAM. México.
5. Boletín Informativo de la Calidad del Aire. Compendio. Octubre 1986 a Abril 1992. SEDESOL.
6. Boletín-Oficina Sanitaria Panamericana. (1991) Algunos datos sobre el ozono y la salud. **111**:3. 270-273 pp.
7. Borek, C. (1988) Ozone carcinogenesis in vitro and its co-carcinogenesis with radiation. En *Living in a chemical world.* Editores C. Maltoni, I.J. Selikoff. New York Academy of Sciences. EUA.
8. Brown, K. A.; T.M. Roberts, L.W. Blank. (1987) Interaction between ozone and cold sensitivity in Norway spruce: a factor contributing to the forest decline in central Europe? *New Phytol.* **105**: 149-155.
9. Campos Lara, M.G. (1990) Efecto del ozono en la reactividad del sistema contráctil no-colinérgico y en el reto antigénico de las vías aéreas de cobayos asmáticos y su relación con la respuesta inflamatoria. Tesis. Facultad de Ciencias. UNAM. México.
10. Cárdenas, Leonardo J. (1994) Participación del transporte en la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Calidad Ambiental.* **1**:9.
11. Castillejos M., D.R. Gold., et al. (1992) Effects of ambient ozone on respiratory function and symptoms in Mexico City schoolchildren. *Am. Rev. Resp. Dis.* **145**:276-282.
12. Castillo Cervantes, S. M en C. (1991) Tesis. Oxidación de monóxido de carbono en catalizadores sol-gel pt/TiO₂. UAM. México, D.F.
13. Comisión Nacional de Derechos Humanos. (1992). *La Contaminación Atmosférica en México. Sus causas y efectos.* México.
14. Cooper, B.J. (1983) Durability of Platinum-Containing Automotive. Exhaust Control Catalysts. *Platinum Metals Review* **27**:4.
15. Cho, Byong K. (1991) Chemical modification of catalyst support for enhancement of transient catalytic activity: nitric oxide reduction by carbon monoxide over rhodium. *J. of Catalysis.* **131**:74-87.

10. Cho, Byong R. (1992) Mechanism of the overall NO + CO reaction system. *Journal of catalysis*. **138**:255-266.
17. Choppin, Gregory R., Bernard Jaffe, Lee Summerlin, Lynn Jackson. (1986) *Química. Publicaciones Cultural. México.*
18. Dann, M.S.; E.J. Pell. (1989) Decline of activity and quantity of ribulose bisphosphate carboxylase/oxygenase and net photosynthesis in ozone-treated potato foliage. *Plant Physiol.* **91**:427-432.
19. DeHayes, D. H.; F.C. Thornton, C.E. Waite, M.A. Ingle. (1991) Ambient cloud deposition reduces cold tolerance of red spruce seedlings. *Can. J. For. Res.* **21**: 1292-1295.
20. Diwell, A.F., B. Harrison. (1981) Car Exhaust Catalysts for Europe. *Platinum Metals Review.* **25**:4.
21. Dütsch, H.U. (1992) Seventy years of ozone research. *Current Science* **63**:12. Diciembre.
22. Environmental Protection Agency (1989) Review of the national ambient air quality standards for ozone: assessment of scientific and technical information. OAQPS staff paper. Research Triangle Park, NC: Office of Air Quality Planning and Standards; EPA reporte no. EPA-450/2-92/001 Disponible de: NTIS, Springfield, VA; PB92-190446.
23. Enyedi, A.J.; N.A. Eckardt. E.J. Pell. (1992) Activity of ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase from potato cultivars with differential response to ozone stress. *New Phytol.* **122**: 493-500.
24. EPA National Air Quality and emissions Trends Report. (1994) EPA 454/R-94-026. Octubre.
25. Exhaust Gas Pollution Control. (1987) *Platinum Metals Review* **31**:4.
26. Ezcurra, E. (1991) ¿Qué mide el IMECA? *Ciencias.* 22 México.
27. Floyd, R. A.; M.S. West, W.E. Hogsett, D.T. Tingey, (1989) Increased 8-hydroxyguanine content of chloroplast DNA from ozone-treated plants. *Plant Physiol.* **91**: 644-647.
28. Folinsbee, L.J. (1992) Human Health Effects of Air Pollution. *Environ. Health Perspectives.* **100**:45-56.
29. Fortoul, T.I., W. Lambert, M. Bliss, H. Bravo, P. Sánchez, I. López, I. Sánchez, L. Villadelmar, O. Rivero and J. Samert. (1995) Acute changes in lung function associated with daily ozone exposures of children attending a day camp in Mexico City. *Am. J. of Resp and Critical Care Med.* **151**:A496.
30. García Vicens, R. (1989) El impacto del transporte automotor en el medio ambiente. *Ingeniería en transporte.* **10**:1. 3-14pp.
31. Garner, J. H. B.; T. Pagano, E.B. Cowling. (1989) An evaluation of the role of ozone, acid deposition, and other airborne pollutants in the forests of eastern North America. Asheville,

32. Global Change News letter. September (1994) No. 19. A New Challenge Assessing Tropospheric Ozone as a Climate Gas.
33. Hayes, E. M.; J.M. Skelly. (1977) Transport of ozone from the northeast U.S. into Virginia and its effect on eastern white pines. *Plant Dis. Rep.* 61: 778-782.
34. Heath, R. L. (1987) Biochemical mechanisms of pollutant stress. In: Heck, W. W.; Taylor, O. C.; Tingey, D. T., eds. *Assessment of crop loss from air pollutants*. New York, NY: Elsevier Applied Science, pp. 259-286.
35. Heck, W. W.; Larsen, R. Y.; Heagle, A.S. (1980) Measuring the acute dose-response of plants to ozone. En: Teng, P.S.; Krupa, S.V., eds. *Crop loss assessment: proceedings of E.C. Stakman commemorative symposium*. St. Paul, MN: University of Minnesota, Agricultural Experiment Station, publicación miscelánea no.7; pp. 32-49.
36. Kainulainen, P.; J.K. Holopainen, H. Hyttinen, J. Oksanen. (1994) Effect of ozone on the biochemistry and aphid infestation of Scots pine. *Phytochemistry*, 35:1 Enero pp.39-42, ISSN 00319422.
37. Lippmann, M. (1991) Health effects of tropospheric ozone. *Environ.Sci. Technol.* 25:12, 1954-1962.
38. López, T., E. Sánchez, E. Poulain, O. Novaro. (1992) Experimental and theoretical studies of tetraethoxysilane gelation doped with Mn (II). *Materials Chem. And Phys*, 32: 286-294.
39. López, T., R. Gómez, O. Novaro, A. Ramírez-Solís, E. Sánchez-Mora, S. Castillo, E. Poulain, and J.M. Martínez-Magadán. (1993) Sol-Gel Ru/SiO₂- Catalysts: Theoretical and experimental determination of the Ru-in-silica structures. *J. of Catalysis* 141, 114-123.
40. Lucas, P. W.; D.A. Cottan, L.J. Sheppard, B.J. Francis. (1988) Growth responses and delayed winter hardening in Sitka spruce following summer exposure to ozone. *New Phytol.* 108: 495-504.
41. McCabe, R.W., C. Wong. (1990) Steady-state kinetics of the CO-N₂O reaction over an alumina-supported rhodium catalyst. *J. of catalysis.* 121
42. McLaughlin, S. B.; R.K. McConathy, D. Duvick, L.K. Mann. (1982) Effects of chronic air pollution stress on photosynthesis, carbon allocation, and growth of white pine trees. *For. Sci.* 28:60-70.
43. Miller, P. R.; O.C. Taylor, R.G. Wilhour. (1982) Oxidant air pollution effects on a western coniferous forest ecosystem. Corvallis, OR: U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory; EPA report no. EPA-600/D-82-276. Available from: NTIS. Springfield, VA; PB83-189308.
44. Minister of Supply and Services Canada. Environment Canada. Atmospheric Environment Service. Catálogo no. En 56-99/1992E. ISBN O-662-19985-5.

- carcinogenic effects of ozone. Ed.Cesare Maltoni e Irving J. Selikoff. Living in a chemical world. Annals of the New York Academy of Sciences. 534.
46. National Research Council. (1991) Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution. National Academy Press. Washington, D.C.
 47. Pell, E. J.; N. Eckardt, A.J. Enyedi. (1992) Timing of ozone stress and resulting status of ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase and associated net photosynthesis. *New Phytol.* **120**:397-405.
 48. Pérez Neria J. (1992) La contaminación del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Revista-Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias.* **5**:2 Abr-Jun.
 49. Primer Informe sobre la Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas 1996. (1997) CENICA. México.
 50. Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. (1990) Octubre.
 51. Quadri, Gabriel; L.R. Sánchez. (1992) La Ciudad de México y la contaminación atmosférica. Limusa. México.
 52. Queiroz, O. (1988) Air pollution, gene expression and post-translational enzyme modifications. En: Schulte-Hostede, S; N.M. Darrall, L.W. Blank, A.R. Wellburn, eds. *Air pollution and plant metabolism.* London, United Kingdom: Elsevier Applied Science; pp.238-254.
 53. Riveros, H.G., J.L. Bravo, V.H. Páramo y J. Tejeda. (1993) Boletín de la A.I.C. Julio-Agosto. México
 54. Riveros, Héctor G. (1992) Viento y contaminación atmosférica *Ciencia.* **43.** 29-34pp.
 55. Riveros, Héctor G., J. Tejeda, L. Ortiz, H. Riveros Rosas. (1995) Emisiones de hidrocarburos en automóviles. *Calidad Ambiental* **2**:4.
 56. Riveros, Héctor G.; J. Tejeda, L. Ortíz, H. Riveros R. (1994) Origen de los hidrocarburos en la atmósfera de la Ciudad de México. *Calidad Ambiental.* **1**:9.
 57. Riveros, Héctor G.; J. Tejeda, L. Ortíz, H. Riveros R., A. Julián-Sánchez. (1995) Hydrocarbons and Carbon Monoxide in the Atmosphere of Mexico City. *Journal of the Air & Waste Management Association.* **45**:973-980.
 58. Roque, Hernández, M.L. (1994) Efectos del ozono sobre la salud humana. Tesis. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM.
 59. Samet, J.M. (1993) Oxidant exposure and lung injury: a hazard identification. *American Association for the advancement of science.* Washington. pp.59-68.

61. Satterfiels, Charles N.(1980) Heterogeneous Catalysis in Practice. McGraw-Hill. EUA.
62. Segura M., Patricia. (1991) Efecto de la exposición a ozono en la respuesta de contracción a la histamina, en tráquea y parénquimas pulmonares de cobayos normales y asmáticos. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. UNAM. México.
63. Smith, J. M. (1986) Ingeniería de la cinética química. Compañía Editorial Continental. México.
64. Strauss, W; S.J. Mainwaring. (1990) Contaminación del aire. Trillas. México.
65. Tingey, D. T., R.G. Wilhour, C. Standley. (1976) The effect of chronic ozone exposures on the metabolite content of ponderosa pine seedlings. For. Sci. **22**:234-241.
66. Tingey, D. T.; G.E. Taylor Jr. (1982) Variation in plant response to ozone: a conceptual model of physiological events. En: Unsworth, M.H.; D.P. Ormrod, eds. Effects of gaseous air pollution in agriculture and horticulure. London, United Kingdom: Butterworth Scientific; pp:113-138.
67. U.S. Environmental Protection Agency. (1986) Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants. Research Triangle Park, NC: Office of Health and Environmental Assessment, Environmental Criteria and Assessment Office; EPA reporte número EPA-600/8-84-020aF-eF. 5v. Disponible en: NTIS, Springfield, VA; PB87-142949.
68. Wark, K., C.F. Warner. (1990) Contaminación del Aire. Origen y Control. Limusa. México.
69. Wilkins, J.J., N.A. Hannington. (1990) The effect of fuel and oil additives on automobile catalyst performance. Platinum Metals Review. **34**:1
70. Wolfenden, J; A.R. Wellburn. (1991) Effects of summer ozone on membrane lipid composition during subsequent frost hardening in Norway spruce (*Picea albies* (L.) Karst.). New Phytol. **118**: 323-329.
71. Zetina Gomora, R.A. (1989) La Contaminación Atmosférica en la ZMCM. Tesis. Facultad de Química. UNAM. México.

Medidas del Programa de Contingencias Ambientales

El Programa de Contingencias Ambientales contempla una serie de medidas preventivas que serán aplicadas en caso de que los niveles de contaminación tiendan a elevarse y el pronóstico meteorológico prevea condiciones difíciles para la dispersión de contaminantes.

Las medidas se han dividido en tres fases dependiendo de la gravedad de la situación.

FASE I

Si el nivel de contaminación fluctúa alrededor de los 250 IMECAS, en amplias zonas de la ciudad y las predicciones atmosféricas son desfavorables, se aplicará la Fase I.

1) Se determinará una reducción del 30 al 40%; pero si los niveles se anticipan muy altos, se determinarán mayores porcentajes de reducción de la actividad industrial.

2) Se implantarán dispositivos específicos para agilizar el tráfico en la zona metropolitana.

3) Se reducirá la circulación de los vehículos de entidades gubernamentales, con excepción de los servicios básicos. Para su mejor identificación, los vehículos gubernamentales tendrán una calcomanía de color en lugar visible.

4) Se suspenderán las tareas de asfaltado, pintura y reparación de calles.

FASE II

La fase II entra en vigencia cuando la contaminación fluctúa alrededor de los 350 IMECAS.

1) Extensión obligatoria del programa "HOY NO CIRCULA" (Lunes: amarillo y rosa; martes: rosa y azul; miércoles: rojo y verde; jueves: verde y rojo; y viernes: azul y amarillo).

2) Suspensión de clases en las escuelas (pre-escolar, primaria y secundaria).

3) Mayor reducción en los niveles de actividad de la industria. Los porcentajes y el tipo de industrias que pudieran cesar sus actividades, se decidirán dependiendo de las condiciones específicas y de la composición de los contaminantes en cada caso.

FASE III

En el caso de alcanzarse una situación crítica, que fluctúa alrededor de los 450 IMECAS, con un pronóstico atmosférico malo, entraría en vigor la Fase III.

Habría una suspensión adicional de actividades, semejante a un asueto general.

Aunque el Plan de Contingencias Ambientales no resuelve problemas a largo plazo, refleja la preocupación y conciencia social acerca de la calidad del aire en nuestra ciudad, donde las industrias bajan su producción y los automovilistas dejan sus autos sin circular. Aunado a esto, la Secretaría de Educación Pública hizo flexibles los horarios, calendarios y actividades escolares en el Valle de México para que estos se ajustaran a las necesidades de protección de los niños.