

Lo  
2 yº

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE CIENCIAS  
UNAM

ANÁLISIS DEL ÍNDICE METROPOLITANO  
DE CALIDAD DEL AIRE  
**IMECA**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**BIÓLOGA**

PRESENTA

*Marcela Benolol Garrido*

DIRECTOR DE TESIS

*Dr. Humberto Bravo Álvarez*



1996

FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCION ESCOLAR

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

M. en C. Virginia Abrín Batule  
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la  
Facultad de Ciencias  
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis:

Análisis del Índice Metropolitano de Calidad del Aire. IMECA

realizado por

Marcela Benolol Garrido  
con número de cuenta 7741721-3 , pasante de la carrera de Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis  
Propietario

Dr. Humberto Bravo Alvarez

Propietario

Ing. Ricardo Torres Jardón

Propietario

Dra. Patricia Guevara Fefer

Suplente

Dr. Pedro Alejandro de Jesús Magaña Melgoza

Suplente

M. en C. ~~FACULTAD DE CIENCIAS~~ Olvera Viducan.

Consejo Departamental de Biología

COORDINACION GENERAL  
DE BIOLOGIA.

---

***A mis padres y abuela:***

les doy las gracias por toda lo que me dieron y enseñaron, pero principalmente por su cariño.

***Mis hermanos***

Marisa, Jaime J. los quiero.

***Mis queridos bebés:***

Moses, los que vienen en camino, Marco y M<sup>ra</sup> Teresa, porque el mundo que les toque sea mejor.

***A mi Tía Licha y Renate***

***A mi asesor***

Dr. Humberto Bravo, por toda la paciencia, ayuda, orientación y principalmente por brindarme su amistad.

**A Ricardo y Rodolfo** quienes sin su ayuda y apoyo hubiera podido realizar este trabajo.

***A la Universidad y sus maestros***

El formar parte de este recinto es un privilegio que todo alumno debe de reconocer.

# ÍNDICE

---

	página
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	iv
Abreviaturas	v
1.- Introducción	1
1.1 Definición y características de un índice	5
1.1.1 Clasificación de los índices	6
1.2 Criterios de Calidad del Aire	8
1.3 Normas de Calidad del Aire	9
2.- Objetivo	11
3.- Metodología	13
4.- Antecedentes	
Revisión bibliográfica de los índices más utilizados en los Estados Unidos Canadá y México	15
5.- Marco Teórico	
Revisión Bibliográfica de los Contaminantes Atmosféricos para los cuales existen los criterios y normas primarias de calidad	21
<b>5.1 Partículas Totales en Suspensión (PST)</b>	
Características y fuentes de origen de las PST	21
Propiedades físicas de las PST	23
Propiedades químicas de las PST	24
Efectos a la salud producidos por las PST	24
Efectos en los vegetación producidos por las PST	29
Efectos en la atmósfera producidos por las PST	29
<b>5.2 Óxidos de Azufre (SOx)</b>	
Características y fuentes de origen de los SOx	32
Propiedades físicas de los SOx	32
Propiedades químicas de los SOx	33
Efectos a la salud producidos por los SOx	34
Efectos en los vegetación producidos por los SOx	36
Efectos en la atmósfera producidos por los SOx	37
Relación del SO <sub>2</sub> con otros contaminantes atmosféricos	38
<b>Oxidantes fotoquímicos (Ox)</b>	
Características y fuentes de origen de los Ox	39
Propiedades físicas de los Ox	41
Propiedades químicas de los Ox	42
Efectos a la salud producidos por los Ox	42
Efectos en los vegetación producidos por los Ox	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

figura	página
1.1 Cálculo del índice	1
1.2 Ubicación de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México	2
1.3 Distribución de las fuentes emisoras en la ZMCM	3
1.4 Composición del parque vehicular	3
4.1 Función para evaluar el subíndice para SO <sub>2</sub> en el sistema PSI (prom. 24 horas)	17
4.2 Ejemplo de un posible reporte del PSI para la televisión	18
4.3 Gráficas comparativas de la función para evaluar el subíndice para monóxido de carbono en los sistemas UNIPEX y PSI	19
5.1.1 Distribución de las partículas en el aire ambiental según su tamaño. Las fracciones de PST y PM <sub>10</sub> han sido monitoreados para determinar las normas dadas por el National Ambient Air Quality Standards	24
5.1.2 Características anatómicas del aparato respiratorio	25
5.1.3 Sitios de depósito de partículas y mecanismos de limpieza	26
5.2.1 Gráfica comparativa en pacientes con severas bronquitis crónicas (55 años de edad o más) al estar expuestos a siete niveles de SO <sub>2</sub> por 24 horas, durante los meses de octubre - noviembre de 1967	35
5.3.1 Ciclo fotolítico de la formación del ozono	40
5.3.2 Ciclo fotolítico de la interacción de moléculas en la formación del ozono	41
5.4.1 Ciclo de formación del NO <sub>2</sub> en la atmósfera	47
6.1 Localización de las estaciones manuales y automáticas de la red de monitoreo	57
6.2 Nueva correspondencia entre las líneas divisorias de las 5 zonas	59
6.3 Ejemplo de un reporte IMECA por hora	60
6.4 Ubicación Actual de la Red Automática de Monitoreo Ambiental	62
6.5 Instituciones que concurren con sus facultades y recursos en la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación	64
7.1 Gráficas comparativas entre los índices IMECA y PSI, para el O <sub>3</sub> donde se muestran los conceptos de eclipsamiento y ambigüedad	67
7.2 Relación entre riesgo a la salud, el grado de contaminación y el costo de control de emisión	70
7.3 Comparación de las Normas Mexicanas de calidad de aire con la utilizada en otros países, para el valor de 100	74
7.4 Comparación entre el IMECA con el PSI, para el valor de 100	75
7.5 Gráficas comparativas entre el Índice PSI utilizado por los Estados Unidos y el IMECA aplicado en México	76
8.1 Número de horas en que la Concentración de Ozono es mayor a 0.11 ppm registrados en la Estación del Centro de Ciencias de la Atmósfera ( Zona suroeste de la ZMCM)	79

## ÍNDICE

---

	página
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	iv
Abreviaturas	v
1.- Introducción	7
1.1 Definición y características de un índice	5
1.1.1 Clasificación de los índices	6
1.2 Criterios de Calidad del Aire	8
1.3 Normas de Calidad del Aire	9
2.- Objetivo	11
3.- Metodología	13
4.- Antecedentes	
Revisión bibliográfica de los índices más utilizados en los Estados Unidos Canadá y México	15
5.- Marco Teórico	
Revisión Bibliográfica de los Contaminantes Atmosféricos para los cuales existen los criterios y normas primarias de calidad	21
<b>5.1 Partículas Totales en Suspensión (PST)</b>	
Características y fuentes de origen de las PST	21
Propiedades físicas de las PST	23
Propiedades químicas de las PST	24
Efectos a la salud producidos por las PST	24
Efectos en los vegetación producidos por las PST	29
Efectos en la atmósfera producidos por las PST	29
<b>5.2 Óxidos de Azufre (SOx)</b>	
Características y fuentes de origen de los SOx	32
Propiedades físicas de los SOx	32
Propiedades químicas de los SOx	33
Efectos a la salud producidos por los SOx	34
Efectos en los vegetación producidos por los SOx	36
Efectos en la atmósfera producidos por los SOx	37
Relación del SO <sub>2</sub> con otros contaminantes atmosféricos	38
<b>Oxidantes fotoquímicos (Ox)</b>	
Características y fuentes de origen de los Ox	39
Propiedades físicas de los Ox	41
Propiedades químicas de los Ox	42
Efectos a la salud producidos por los Ox	42
Efectos en los vegetación producidos por los Ox	43

Efectos en la atmósfera producidos por el Ox	44
<b>Óxidos de nitrógeno (NOx)</b>	
Características y fuentes de origen de los NOx	45
Propiedades físicas de los NOx	45
Propiedades químicas de los NOx	46
Efectos a la salud producidos por los NOx	47
Efectos en los vegetación producidos por los NOx	48
Efectos en la atmósfera producidos por los NOx	48
<b>Monóxido de Carbono (CO)</b>	
Características y fuentes de origen del CO	50
Propiedades físicas del CO	50
Propiedades químicas del CO	51
Efectos a la salud producidos por el CO	51
Efectos en los vegetación producidos por el CO	52
6.- Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA)	53
Modificaciones al índice Metropolitano de la Calidad del Aire	63
7.- Resultados y Discusión con base en la revisión del IMECA	65
8.- Conclusiones y Sugerencias	79
Apéndice A	85
Bibliografía	89



## ÍNDICE DE FIGURAS

---

figura	página
1.1 Cálculo del índice	1
1.2 Ubicación de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México	2
1.3 Distribución de las fuentes emisoras en la ZMCM	3
1.4 Composición del parque vehicular	3
4.1 Función para evaluar el subíndice para $\text{SO}_2$ en el sistema PSI (prom. 24 horas)	17
4.2 Ejemplo de un posible reporte del PSI para la televisión	18
4.3 Gráficas comparativas de la función para evaluar el subíndice para monóxido de carbono en los sistemas UNIPEX y PSI	19
5.1.1 Distribución de las partículas en el aire ambiental según su tamaño. Las fracciones de $\text{PST}$ y $\text{PM}_{10}$ han sido monitoreados para determinar las normas dadas por el National Ambient Air Quality Standards	24
5.1.2 Características anatómicas del aparato respiratorio	25
5.1.3 Sitios de depósito de partículas y mecanismos de limpieza	26
5.2.1 Gráfica comparativa en pacientes con severas bronquitis crónicas (55 años de edad o más) al estar expuestos a siete niveles de $\text{SO}_2$ por 24 horas, durante los meses de octubre - noviembre de 1967	35
5.3.1 Ciclo fotolítico de la formación del ozono	40
5.3.2 Ciclo fotolítico de la interacción de moléculas en la formación del ozono	41
5.4.1 Ciclo de formación del $\text{NO}_2$ en la atmósfera	47
6.1 Localización de las estaciones manuales y automáticas de la red de monitoreo	57
6.2 Nueva correspondencia entre las líneas divisorias de las 5 zonas	59
6.3 Ejemplo de un reporte IMECA por hora	60
6.4 Ubicación Actual de la Red Automática de Monitoreo Ambiental	62
6.5 Instituciones que concurren con sus facultades y recursos en la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación	64
7.1 Gráficas comparativas entre los índices IMECA y PSI, para el $\text{O}_3$ donde se muestran los conceptos de eclipsamiento y ambigüedad	67
7.2 Relación entre riesgo a la salud, el grado de contaminación y el costo de control de emisión	70
7.3 Comparación de las Normas Mexicanas de calidad de aire con la utilizada en otros países, para el valor de 100	74
7.4 Comparación entre el IMECA con el PSI, para el valor de 100	75
7.5 Gráficas comparativas entre el Índice PSI utilizado por los Estados Unidos y el IMECA aplicado en México	76
8.1 Número de horas en que la Concentración de Ozono es mayor a 0.11 ppm registrados en la Estación del Centro de Ciencias de la Atmósfera ( Zona suroeste de la ZMCM)	79

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tablas	página
1.1 Resumen de los contaminantes mas frecuentemente encontrados en la atmósfera	4
4.1 Comparación del PSI Estadounidense con el Sistema UNIPEX	18
4.2 Variables que manejan los diferentes índices de calidad del aire	20
5.1.1 Regiones de depósito y limpieza de partículas en el tracto respiratorio	
5.1.2 Posibles respuestas a las deposiciones de las partículas en el tracto respiratorio	30
5.2.1 Propiedades físicas del bióxido de azufre.	33
5.2.2 Propiedades físicas del trióxido de azufre.	33
5.2.3 Umbrales de concentración para $\text{SO}_2$ , $\text{H}_2\text{SO}_4$ y sus combinaciones.	35
5.2.4 Daños generados en plantas a diferentes concentraciones	37
5.3.1 Propiedades físicas del $\text{O}_3$	41
5.3.2 Propiedades físicas del PAN	42
5.3.3 Capacidad respiratoria en personas expuestas al $\text{O}_3$	43
5.4.1 Propiedades físicas del NO	45
5.4.2 Propiedades físicas del $\text{NO}_2$	46
5.4.3 Efectos a la salud producidos por el $\text{NO}_2$	47
5.4.4 Daños crónicos y efectos fisiológicos en la vegetación producidos por el NO y el $\text{NO}_2$	49
5.5.1 Propiedades físicas del monóxido de carbono	50
5.5.2 Efectos en la salud de los diferentes niveles de carboxihemoglobina (CoHb) en sangre	52
6.1 Criterios base para la evaluación del 100 de la calidad del aire	54
6.2 Valores de concentración de contaminantes que representan daño significativo para la salud (500)	54
6.3 Coeficientes para calcular el IMECA	55
6.4 Determinación de los puntos de quiebre de IMECA	56
6.5 Acciones del Programa de Contingencia del IMECA	61
8.1 Efectos a la salud Asociados con el Índice de Contaminantes Estandarizados (Pollutant Standards Index PSI)	83

## ABREVIATURAS

---

CO	monóxido de carbono
COH	coeficiente de Suciedad Atmosférica
CoHb	carboxihemoglobina
DDF	Departamento del Distrito Federal
EPA	Environmental Protection Agency
HC	hidrocarburos
IMEXCA	Índice Mexicano de Calidad del Aire
IMECA	Índice Metropolitano de Calidad del Aire
luz <i>uv</i>	luz ultravioleta
$\mu$ m	micrómetro ( $10^{-6}$ m)
$\mu$ g	microgramo ( $10^{-6}$ g)
NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
NMHC	hidrocarburos menos metano
NO <sub>2</sub>	dióxido de nitrógeno
NO	monóxido de nitrógeno
NOx	óxidos de nitrógeno
O <sub>3</sub>	ozono
PAN	nitrato de peroxiacetilo
PM <sub>10</sub>	partículas cuyo diámetro sea $<$ a $10^{\mu}$ m
PM <sub>2.5</sub>	partículas cuyo diámetro sea $<$ a $2.5^{\mu}$ m
ppm	partes por millón
PSI	Pollutant Standard Index
PST	partículas suspendidas totales
RAMA	Red Automática de Monitoreo Ambiental
SEDUE	Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología
SO <sub>2</sub>	dióxido de azufre
UMA	unidad de masa atómica
UNIPEX	Índice Uniforme de la Contaminación Internacional del Aire
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México

# 1.- INTRODUCCIÓN

El interés actual sobre el incremento de la contaminación atmosférica en la Cuenca del Valle de México, ha provocado la necesidad de crear métodos indirectos de información al público sobre los diferentes niveles de contaminación atmosférica que se presentan diariamente asociados a posibles efectos a la salud.

Una manera sencilla de informar cada día es a través de un índice de calidad del aire: en el cual los valores de concentración (ppm y/o  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de los contaminantes criterio y su relación con sus normas de calidad del aire primarias (relacionadas con efectos en la salud) son transformadas por medio de una ecuación matemática en números adimensionales (sin unidad), mismos que pueden ser fácilmente comprendidos por el público en general (fig. 1.1), así como de proporcionar las recomendaciones a seguir desde el momento en que se rebasen estas normas para poder informar y prever episodios o situaciones con posibles efectos a la salud.

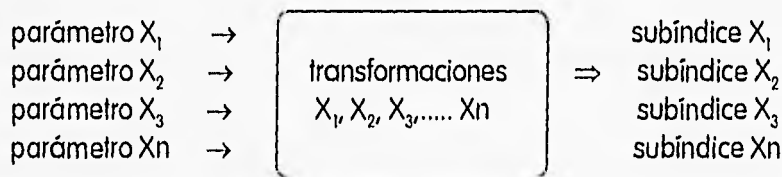


figura. 1.1 Cálculo del índice

Este interés sobre el incremento en la contaminación, trae para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) la necesidad de utilizar un índice de calidad de aire que sea confiable y que evalúe los niveles de concentración de contaminantes a través del tiempo así como sus efectos en la salud, esto se debe a que esta zona urbana presenta un caso muy especial de contaminación atmosférica por su localización dentro de Cuenca del Valle de México, a una altitud de 2240 m/nm, se encuentra rodeada por varios sistemas montañosos, (fig.1.2) y asienta una población de más de 20 millones de habitantes establecidos en una

área aproximada de 2500 km<sup>2</sup> . Su población requiere de una gran infraestructura de servicios, los que al ser satisfechos provocan entre otros efectos, la emisión de contaminantes en la atmósfera, alterando de esta forma la calidad del aire. (Bravo 1979, Bravo 1987)

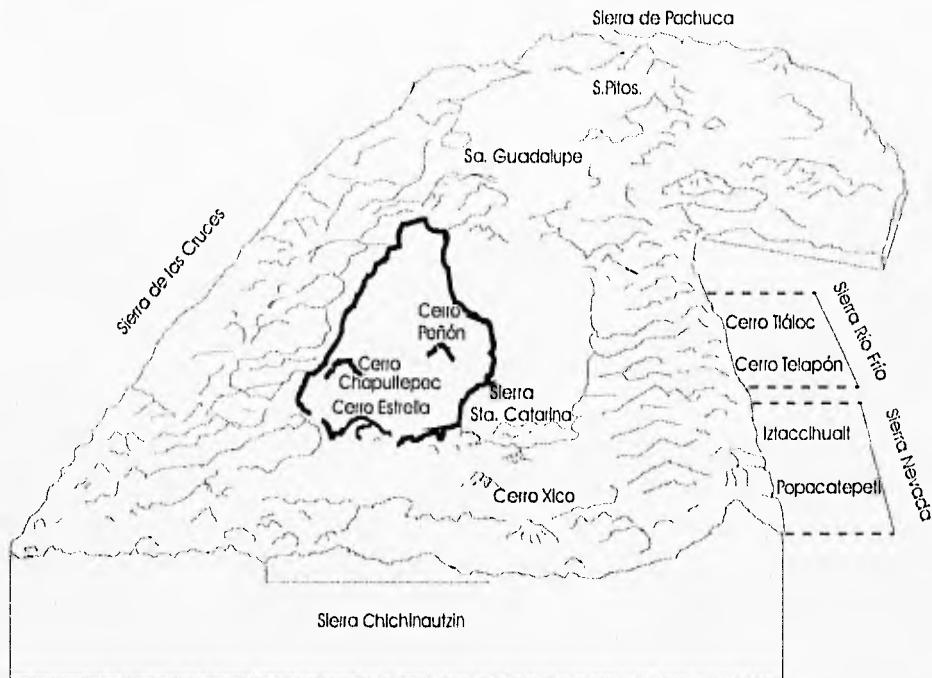


figura. 1.2 Ubicación de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Fuente: Bravo: Journal of Air Pollution Control Association: 1961

Dentro de las principales fuentes causantes del deterioro atmosférico encontramos : (figura. 1.3)

- a) La Refinería "18 de marzo" como estación de almacenamiento y distribución de combustibles, con una emisión estimada de hidrocarburos de 4.2 ton/año (102,020 kg/día).
- b) Dos plantas termoeléctricas ( la "Jorge Luque" y la del "Valle de México") que consumen 1,108,616,977 m<sup>3</sup>/año de gas natural (en temporada invernal) y combustóleo (resto del año), generando 97, 679 ton /año de contaminantes, más de la cuarta parte de lo que producen todas las fuentes estacionarias de la ZMCM (Industrias y comercios). Con el cambio a gas natural se redujeron cerca de un 80% las emisiones de SO<sub>2</sub> a la atmósfera, siendo el CO y NOx los contaminantes mas importantes que se emiten por estas termoeléctricas. (Air Pollution Control in the Mexico City Metropolitan Area 1991; Quadri y Sánchez, 1992 )
- c) 30,124 establecimientos industriales donde el 75% de estos corresponden a micro-industrias, 20% a pequeñas industrias, el 3% a la mediana y pequeña industria y el 2% a las grandes industrias. (Comisión Metropolitana, 1992)

d) Más de 20,000 establecimientos comerciales.

e) En 1992 circulaban aproximadamente  $2.8 \times 10^6$  de vehículos (ver figura 1.4), que consumían 100,000 barriles diarios de gasolina ( $16 \times 10^6$  de litros de gasolina/día), generando 1,607.55 ton /día de contaminantes. ( 586,756 ton /año).

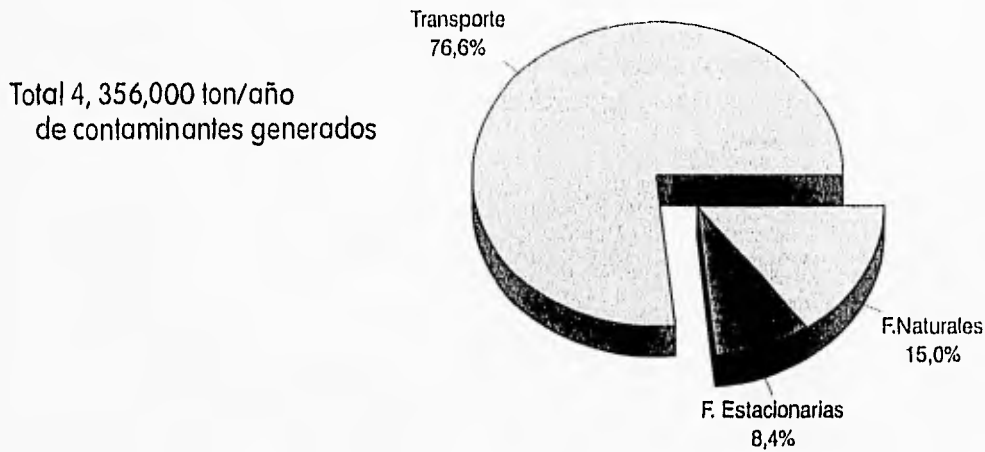


Figura 1.3 Distribución de los fuentes emisoras en la ZMCM.

Fuente: Comisión Metropolitana, 1992

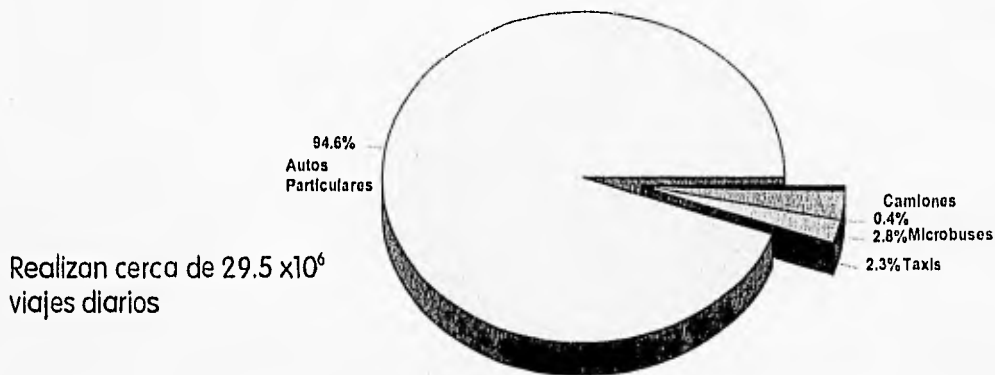


Figura 1.4 Composición del parque vehicular.

Fuente: Comisión Metropolitana, 1992

Todos estos contaminantes emitidos, como las partículas suspendidas, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, oxidantes fotoquímicos y monóxido de carbono, resultan perjudiciales a la salud al presentarse en altas concentraciones en el aire que se respira y son los causantes o desencadenantes de la mayor parte de las enfermedades broncopulmonares y otras que padecen los habitantes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Marco Teórico.). Ver tabla 1.1

Ante tal perspectiva en 1979 la Subsecretaría del Mejoramiento del Medio Ambiente, dependencia de la Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA) elabora el Índice Mexicano de Calidad del Aire (IMEXCA) el cual fue elaborado por la compañía TECNOCONSULT, siguiendo los lineamientos dados por la SSA y posteriormente la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) elabora a finales de 1986 el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA).

Ambos índices fueron diseñados, tomando en cuenta los estudios realizados por Thom y Ott en 1975 y 1976. Aunque el IMECA ha mejorado la calidad de información al público así como su forma de monitoreo con respecto al IMEXCA es todavía necesario perfeccionar su metodología y criterio para que proporcione la confiabilidad que se requiere de esta herramienta de información.

Tabla 1.1 Resumen de los contaminantes mas frecuentemente encontrados en la atmósfera.

CONTAMINANTES	EMISIONES PROVENIENTES DE FUENTES ANTROPOGÉNICAS	COMPOSICIÓN	EFFECTOS EN LA SALUD	EFFECTOS EN LOS VEGETALES
PRIMARIOS				
Partículas	de combustión: estacionaria o móvil, de procesos industriales, de desechos sólidos.	fluoruras, Be, Pb/PbCl/Br, asbestos, Cd, CaCO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , S, MgO.	Según el tipo y tamaño de las partículas puede generar: Resequedad de la nariz, Rinitis, Cáncer nasal, Cáncer en laringe, Asma, bronquitis, Influenza	Debido a la gran variedad de partículas, tenemos una gran heterogeneidad de efectos como las partículas que al contactar con agua se cristalizan sobre las superficies de las hojas, reduciendo la actividad fotosintética y dejando a las plantas susceptibles al ataque de las plagas.
Óxidos de Azufre	de combustión: estacionaria o móvil, de procesos industriales, de desechos sólidos.	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> .	Irritación de vías respiratorias, Broncoconstricción, disminución de frecuencia respiratoria, asma, sinusitis, neumonías, disminución del ritmo alfa y sensibilidad del ojo	Las plantas presentan daños agudos y crónicos. Las hojas se dañan a nivel de cloroplastos por acción de sulfatos y ácido sulfuroso.
Óxidos de Nitrógeno	de combustión: estacionaria o móvil, de procesos industriales, de desechos sólidos.	NO <sub>2</sub> , NO, N <sub>2</sub> O, y en forma inestable el NO <sub>x</sub>	Tóxico e irritante, potencialmente relacionado con fibrosis pulmonar crónica, incremento en susceptibilidad a infecciones respiratorias.	Hay colapsos celulares, clorosis en tejida foliar, alteraciones en crecimiento y producción
Monóxido de Carbono	de combustión: estacionaria o móvil, de procesos industriales.	CO	decremento en el rendimiento de ejercicio, cefáleas, problemas de coordinación.	Las plantas presentan epie hiponastia en las hojas.
SECUNDARIOS				
Oxidantes fotoquímicos	productos secundarios originados por las reacciones entre los HC y los NO <sub>x</sub> .	O <sub>3</sub> , PAN, sulfatos, nitratos	cambios químicos y bioquímicos en pulmones, Irritaciones oculares y mucosas.	Presentan clorosis y alteraciones en el crecimiento.

## 1.1 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE UN ÍNDICE.

Un índice de calidad del aire tiene como objetivo:

*Informar al público de los niveles de contaminación atmosférica en relación a la salud, esto se realiza al transformar las concentraciones de los contaminantes criterio y su relación con las normas primarias\* de calidad del aire o episodios en una escala de 0 a 500 en unidades adimensionales, que indique el nivel de contaminación que exista en cualquier localidad; y que sea fácilmente comprendido por el público.*

Un índice de calidad del aire también informa al público el resultado de la implantación de estrategias de control para la calidad del aire (Ott y Thom, 1976).

En 1974 en los Estados Unidos de América el Council on Environmental Quality (CEQ) y el U.S. Environmental Protection Agency (EPA) realizaron estudios para determinar las características técnicas de un índice adecuado: del estudio de cincuenta y cinco agencias que informaban con diversos índices, estos fueron cada uno analizados y comparados usando un sistema de clasificación de índices los cuales evaluaron cuatro características estructurales: (Thom y Ott, 1975).

- 1.- Número de variables
- 2.- Método de Cálculo
- 3.- Modo de Cálculo
- 4.- Descriptor de Categorías

Lo anterior dio como resultado 14 diferentes índices, así como los 10 criterios necesarios en la elaboración de cualquier índice. Estos criterios dados por Thom y Ott en 1975 son:

- a) *Ser fácilmente comprendido por el público* → Para esto el índice debe de transformar las concentraciones y su relación a la salud de cada contaminante criterio en un valor adimensional el cual sea sencillamente entendido por el público.
- b) *Que no sea inconsistente con los niveles de contaminación percibidos* → El índice debe calcular y presentar los valores por separado.
- c) *El significado tiene una importancia espacial* → Depende de la forma de selección y procesamiento de los datos.

---

\* Norma primaria- Es el producto de una legislación donde se dice cual es la frecuencia y duración de cada contaminante criterio con el fin de proteger la salud y bienestar del hombre



- d) *Incluir el mayor número de contaminantes y poder admitir nuevos contaminantes futuros sin modificar su forma básica* → El índice debe de incluir todos aquellos contaminantes que hayan sido identificados como los mayores contaminantes del aire y para los cuáles las normas de calidad del aire y los criterios de episodios han sido establecidos.
- e) *Ser calculado en una forma simple utilizando hipótesis razonables* → Las concentraciones del contaminante deben ser fácilmente convertibles a su valor de índice utilizando una sencilla ecuación o gráficas apropiadas al valor del índice contra la concentración del contaminante.
- f) *Que exista sobre bases científicas razonables* → El índice debe de relacionar a las normas de calidad del aire y criterios de episodios, que deben de tener una base científica.
- g) *Que se relacione con los estándares de la calidad del aire ambiental* → Se debe relacionar, con las Normas Primarias de Calidad del Aire, las cuales han sido establecidos para los seis contaminantes criterio.
- h) *Relacionar los episodios críticos* → Criterios: de alerta , emergencia y los niveles de daño a la salud han sido establecidos para los seis contaminantes estudiados.
- i) *Presentar diariamente las variaciones en la calidad del aire*
- j) *Poder predecir con un día de adelanto (opcional)* → La predicción se realizará cuando la información y la tecnología existente lo permita, por ejemplo: el bióxido de azufre y las partículas suspendidas, están basados en los tiempos promedios de 24 horas y el ozono en concentración promedio de una hora.

### **1.1.1 Clasificación de los Índices**

Un índice en cualquier sistema tiene ámbito de valores específicos para catalogar la calidad del aire, estos valores son determinados como *categorías descritas*, por ejemplo:

Monóxido de Carbono (CO)

0 - 3 ppm bueno

3 - 15 ppm satisfactorio

15 - 40 ppm poco satisfactorio

Los índices de calidad del aire pueden estar agrupados en dos categorías:

a) índices a largo plazo

b) índices a corto plazo

- a) Un índice a largo plazo se utiliza para evaluar los cambios en la calidad del aire en período de años (Índice de Calidad del Aire de Mitre. MAQI).
- b) Un índice de calidad del aire a corto plazo son los que informan al público sobre las variaciones diarias en los niveles de contaminación.

## Sistema de clasificación para los índices

Para facilitar el estudio de los índices, desarrollaron Thom y Ott en 1976, una clasificación de índices basada en cuatro criterios:

- a) Número de variables incluidos en el índice.
- b) Método usado para calcular el índice.
- c) Forma de cálculo (combinados o aislados).
- d) Categorías descritas para cada índice.

a) *Número de variables incluidos en el índice.* Estas variables son las que están incluidas en el NAAQS ( National Ambient Air Quality Standards) en Estados Unidos y las Normas de Calidad de Aire en México.

b) *Método usado para calcular el índice.* Presenta cuatro maneras diferentes de cálculo los **A**, **B**, **C** y **D**; **A**, **B** y **C** se sustentan en una ecuación y **D** se basa en las concentraciones actuales.

**[A]** La ecuación que presenta da una función exponencial.

**[B]** Presenta una ecuación lineal de una o más variables con coeficientes no constantes, sus pendientes son variables según el rango del contaminante. Es una función lineal segmentada.

**[C]** Es una función lineal de una o más variables en la que la pendiente para cada variable y rango de contaminación se mantiene constante.

**[D]** Da las concentraciones actuales y las reporta en  $\mu\text{g} / \text{m}^3$  y partes por millón (ppm)

c) *Forma de cálculo (combinados o aislados).* Es otra manera de ver como el índice maneja sus variables y se clasifican en:

1. Individual .- Un valor único es dado para cada variable del índice
2. Máxima .- Solamente un valor máximo de la variable del índice es reportado.
3. Combinado .- Maneja todas las variables juntas para dar un sólo valor del índice

d) *Categorías descritas para cada índice.* Es la palabra asignada a cada categoría que describe cualitativamente la calidad del aire.

La descripción de una categoría puede basarse en:

[A] Valores estándares (dados por NAAQS y /o la Norma Mexicana de Calidad del Aire)

[B] Valores estándares ( dados por NAAQS, los criterios de episodios y /o la Norma de Calidad del Aire.)

[C] Arbitrario. Es semi-empírico y se basa en sus propios valores.

## Clasificación de un Índice

Ejemplo: Índice Urbano Estandarizado de Calidad del Aire (SUAQUI) es un índice tipo:

**5 B<sub>2</sub> B**

a) Número de variables incluidas en el índice → **5**

b) Método utilizado para calcular un índice → **B** (lineal -segmentado)

c) Manera de cálculo → **2** (Máximo)

d) Categoría descrita → **B** (Estandar y Criterios de Episodios)

## 1.2 CRITERIOS DE CALIDAD DEL AIRE

a) Un criterio de calidad del aire nos indica en base a estudios a nivel internacional de carácter multidisciplinario los efectos producidos en el hombre y su ambiente por la contaminación del aire. Tal criterio nos proporciona bases realistas a considerar para determinar hasta que punto el nivel de contaminación debe ser reducido, si pensamos proteger la salud y el bienestar de la población.

Al ir aumentando nuestro conocimiento científico, los criterios de calidad del aire tendrán que ser revisados y seguramente modificados.

b) Son la expresión del conocimiento científico de la relación entre varias concentraciones de los contaminantes en el aire y sus efectos negativos en el hombre, en el ambiente y en sus bienes.

c) Son descriptivos: esto es; describen los efectos que se han observado cuando las concentraciones de los contaminantes del aire alcanzan valores específicos en un período determinado. Al desarrollar estos criterios se han considerado:

➤ Las características físico-químicas de cada uno de los contaminantes así como su tiempo de permanencia en diversas condiciones ambientales.

- La contribución de las variables ambientales y situaciones geográficas dadas a evaluar los efectos de la contaminación del aire sobre la salud, la agricultura, la visibilidad, daños a los materiales y las alteraciones al clima.

### **1.3 NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE.**

Las Normas de Calidad del Aire fijan las concentraciones, duración y frecuencia de contaminantes criterios para una jurisdicción política, no debiéndose de excederse en ninguno de los aspectos mencionados y deben de ser usados como uno de varios factores al diseñar reglamentos para diseñar las normas de emisión de contaminantes en el aire.

Las Normas pueden ser primarias o secundarias:

- **Normas de calidad primaria** .- fijan o determinan la frecuencia o duración de las concentraciones del contaminante criterio que protejan la salud y el bienestar del hombre.
- **Normas de calidad secundaria** .- se fija en la frecuencia y duración de las concentraciones de los contaminantes criterio que proteja a los animales, las plantas, ecosistemas y el deterioro de los bienes materiales.



## 2.- OBJETIVO:

- 1.- Señalar los conceptos que constituyen:
  - a) Índice de Calidad del Aire.
  - b) Criterios necesarios para establecer las normas.
  - c) Normas primarias de calidad de aire
- 2.- Analizar los diferentes índices de calidad del aire aplicados por los Estados Unidos, Canadá y principalmente los de México.
- 3.- Analizar el índice de calidad de aire IMECA para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
- 4.- Indicar la necesidad de utilizar un índice de calidad del aire con base en los efectos a la salud.
- 5.- Realizar las recomendaciones relativas a la implementación del índice adecuado a las necesidades de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.



### 3.- METODOLOGÍA

#### 1.- Precisar:

- 1.1 Cual es la situación prevalescente en la ZMCM, en cuanto a la calidad del aire que respiramos;
- 1.2 Identificar las fuentes responsables de este deterioro ambiental; reconocer cuales son las características y funciones de un índice, un criterio y una norma.

#### 2.- Revisión de las publicaciones sobre los diversos índices de calidad de aire diseñados, para delimitar las características que definan a un índice.

#### 3.- Revisión bibliográfica de los contaminantes atmosféricos referidos en los índices de calidad del aire, que sirva de sustento para dar la importancia al uso de un índice adecuado.

3.1 Origen y características físico-químicas de cada uno de los contaminantes atmosféricos considerados en los índices de calidad del aire.

3.2 Daños generados en la salud, en la vegetación y en la atmósfera por los contaminantes manejados en los índices de calidad del aire.

#### 4. - Hacer una descripción más detallada sobre el Índice Metropolitano de Calidad del Aire desde su creación hasta las últimas modificaciones.

#### 5.- Tomando como base el Trabajo realizado por la compañía Tecnoconsult sobre el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) se hará un desglose siguiendo el orden establecido en el escrito antes mencionado, de tal manera que: con base en la revisión y análisis del IMECA, se propongan los cambios que debieran efectuarse para una implementación adecuada al índice, tomando como guía el índice norteamericano Pollutant Standard Index (PSI).





## 4.- ANTECEDENTES

### 4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LOS ÍNDICES MAS UTILIZADOS EN LOS ESTADOS UNIDOS CANADÁ Y MÉXICO.

A continuación se presenta un resumen de los diversos índices de calidad de aire utilizados en los Estados Unidos de Norteamérica, Canadá y México; procediendo su clasificación en base a:(ver tabla en página 20 )

- ✓ número de contaminantes incluidos,
- ✓ método de cálculo de los subíndices,
- ✓ modo de cálculo del índice y
- ✓ categorías descritas utilizadas.(ver sección 1.1 página 5)

El índice Combinado de Green (GI)

El índice de Productos en Combustión (CPI)

El índice de la Proporción de Contaminantes Indeseables Respirados M.U.R.C.

El índice de Contaminación Atmosférica de Ontario (API)

El índice de Calidad de Aire

El índice PINDEX

El índice de Calidad del Aire de Oak Ridge (ORAQI)

El índice de Calidad del Aire de Mitre (MAQI)

El índice del Valor Extremo (EVI)

La relación de los tiempos promedios cortos de los estándares de Calidad del Aire (S.T.A.R.A.Q.S.)

El índice Canadiense de Calidad del Aire

El índice Urbano Estandarizado de la Calidad del Aire (SUAQI)

El índice de Contaminación Estándar (PSI)

El índice Uniforme de la Contaminación Internacional del Aire (UNIPEX)

El índice Mexicano de Calidad del Aire (IMEXCA)

El índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)

**El índice Combinado de Green (GI).** Propuesto por Green en 1966. Es un índice  $2A_3C$ . Sus dos contaminantes en los que se basa son el Bióxido de Azufre ( $SO_2$ ) y en el Coeficiente de Suciedad Atmosférica (COH).(principio se absorción de luz por partículas. (Chow Judith, 1995; Hemeón, 1953 y Herrick, 1989))

Es un índice a corto plazo que se aplica principalmente en invierno por el incremento en la concentración de estos contaminantes ( $SO_2$  y COH).

**El índice de productos en Combustión (CPI)** . Propuesto en 1967 por Rich. Este índice se clasifica como  $2C_1C$ . Muestra una relación entre la cantidad de combustible quemado, con el área-volumen de ventilación.

**El índice M.U.R.C.** (M.U.R.C. index, 1968). Aparece en 1968 y su principal interés es el de reportar la suciedad atmosférica. Es un índice tipo 1A<sub>3</sub>C.

**El índice de Contaminación Atmosférica de Ontario (API)** · Es un índice semejante al índice combinado de Green propuesto por Schenfeld en 1970, la diferencia radica en que este usa valores estándares y los criterios de episodios. Por su estructura este índice está clasificado como el tipo 2A<sub>3</sub>B.

**Índice de Calidad del Aire** · Aparece en 1969, fue propuesto por Fensterok y Goldman. Es un índice combinado a corto plazo, que puede trabajar al mismo tiempo hasta con cinco contaminantes, es del tipo nC<sub>3</sub>C donde n = 1 a 5 contaminantes.

**El índice PINDEX** · Elaborado en 1970 por Babcock; es un índice tipo 7C<sub>3</sub>C. La importancia fundamental de este índice radica en la relación entre el bióxido de azufre con las partículas totales en suspensión en una acción sinérgica y la relación de la formación de oxidantes fotoquímicos por la acción de la radiación solar como uno de sus precursores. Establece sus propios valores de tolerancia.

**El índice de Calidad del Aire de Oak Ridge (ORAQI)** · Es desarrollado en 1971 por Thomas, Babcock y Shults está diseñada para cada contaminante incluido en el índice y sea igual a su estándar del valor de 100 (valor crítico). En general, los valores para ORAQI pueden ser determinados por un nomograma o por una ecuación matemática, el tipo de índice es nA<sub>3</sub>A donde n = 1 a 5 contaminantes.

Este índice utiliza las normas ambientales de 24 horas como factores de ponderación por lo tanto es un índice a corto plazo.

**El índice de Calidad del Aire de Mitre (MAQI)** (Bisello y Luboro 1972). Se basa en la relación de las concentraciones ambientales máximas horarias y anuales con las normas federales americanas. Es un índice que maneja hasta cuatro contaminantes y por su estructura es del tipo nA<sub>3</sub>A.

**El índice del Valor Extremo (EVI)** (Bisello y Luboro 1972). Está calculado en forma semejante a MAQI. El esquema de cálculo evita el fenómeno de eclipsamiento. Este índice es de tendencias a largo plazo, sin embargo, la información básica para EVI son solamente concentraciones promedio a corto término en un rango de 1 a 24 hr. durante un año completo.

**La relación de los tiempos promedios cortos de los estándares de Calidad del Aire (S.T.A.R.A.Q.S.)** Fue propuesto por Miller en el año de 1973, este índice incluye los contaminantes para los cuales existe una norma de calidad criterio, los hidrocarburos y la visibilidad, es un índice que está clasificado como 7B<sub>3</sub>A.

**El índice Canadiense de Calidad del Aire** Fue propuesto por Inhaber en 1975, es semejante al índice S.T.A.R.A.Q.S. maneja el mismo número de contaminantes más un octavo factor, correspondiente a las emisiones industriales. Índice clasificado como 8A<sub>3</sub>A.

**El Índice Urbano Estandarizado de Calidad del Aire (S.U.A.Q.I.)** (Council on Environmental Quality, 1976) Elaborado a finales de 1975 y es del tipo 5B<sub>2</sub>B. Este índice de calidad del aire incluye los

contaminantes criterio de las NAAQS y Criterios para episodios. Lo importante de éste índice es que a partir de él se deriva otro índice estandarizado más simple y que se relaciona con los NAAQS primarios y sus efectos en la salud: el PSI.

**El índice de Contaminación Estándar (PSI)** (Hunt y Ott 1977, EPA Measuring Air Quality 1978, Thom y Ott 1976). Fue diseñado para ser lo más flexible permitiendo decidir los mecanismos de control del aire contaminado. Este índice utiliza seis categorías descriptivas incluyendo en ellas los efectos a la salud. Es un índice del tipo 5B<sub>2</sub>B. (ver figura. 4.1).

La figura 4.2 es un ejemplo de como se puede informar al público la calidad de aire, indicando el o los contaminantes problema y que las implicaciones a la salud que pueden manifestarse.

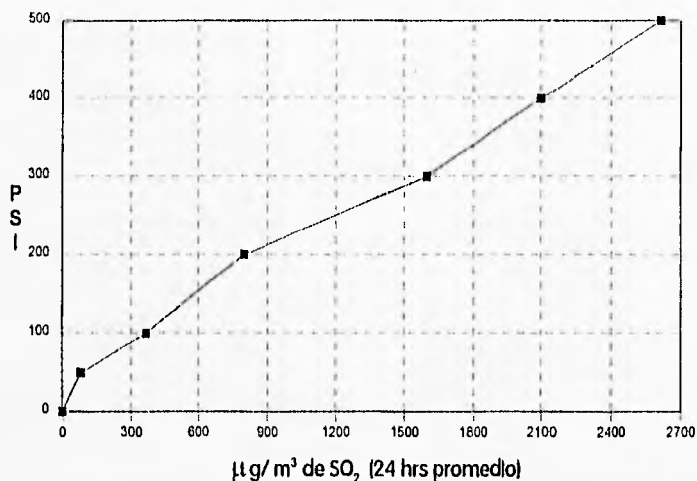


figura 4.1 Función para evaluar el subíndice para el SO<sub>2</sub> en el Sistema PSI (Prom. 24 hrs)

**Índice Uniforme de la Contaminación Internacional del Aire (UNIPEX)** Fue propuesto por Thom y Ott en 1975. Este índice surge como una herramienta de control para países que carecen de una base científica y que tienen problemas de contaminación. El objetivo de UNIPEX es el de elaborar un índice internacional uniforme que:

- ▶ evite la proliferación de índices,
- ▶ facilite la comprensión de los niveles de contaminación del aire para los extranjeros y
- ▶ permite comparar los niveles de contaminación en diferentes países, así, que abre nuevas líneas internacionales de comunicación.

A este índice se le designan dos puntos de quiebre para determinar las funciones subíndices y una norma para concentraciones en períodos cortos, basadas en efectos sobre la salud. Thom y Ott han recomendado que la concentración seleccionada para la determinación de los puntos de quiebre se base en la Norma Primaria Americana de Calidad del Aire (NAAQS) y en los niveles de daño significativo a la salud ya que estos se basan en información científica.

La estructura básica del índice está dada en la tabla 4.1. y figura 4.3 que muestra que UNIPEX es una típica función comparada a la función del monóxido de carbono del PSI. Es importante hacer notar que la función UNIPEX es lineal por arriba del valor de 100, mientras



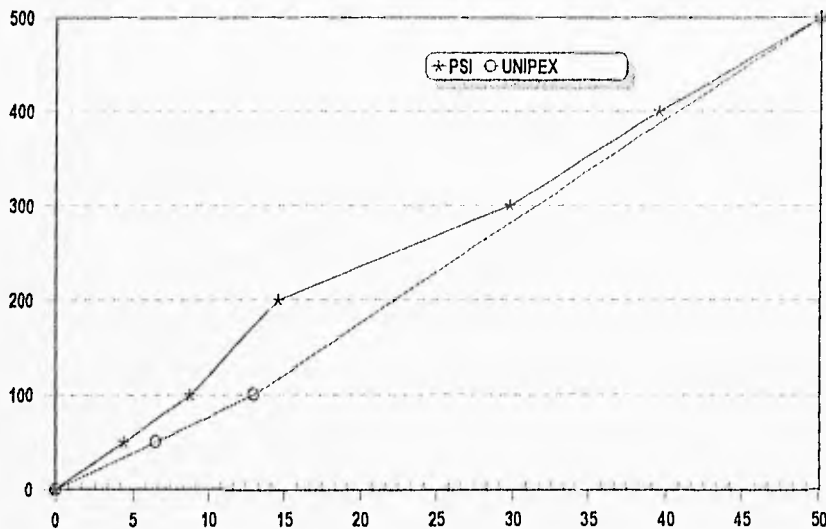


figura. 4.3 Gráficas comparativas de la función, para evaluar el subíndice monóxido de Carbono (8hrs Promedio en los Sistemas UNIPLEX y PSI.)

**Índice Mexicano de Calidad del Aire. (IMEXCA).** (Subsecretaría del Mejoramiento del Medio Ambiente, 1978, 1979). Este índice fue elaborado por la compañía TECNOCONSULT en 1978 tomando como base las disposiciones dadas por la entonces Subsecretaría del Mejoramiento del Medio Ambiente (SMA). Este índice se basó fundamentalmente en la metodología propuesta por el sistema UNIPLEX. (5C<sub>2</sub>B).

Para el monitoreo del IMEXCA se compró tecnología holandesa ya descontinuada lo que dificultó el no poder dar el mantenimiento adecuado a los aparatos. Esto trajo como consecuencia: errores en las mediciones de los contaminantes y el no tener un registro continuo de las concentraciones por no estar en buen estado los mismos.

**Índice Metropolitano de Calidad del Aire. (IMECA).** (SEDUE, 1986). Fue elaborado por la Compañía TECNOCONSULT en 1986, siguiendo los lineamientos dados por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) y basándose casi por completo en el IMEXCA. A lo largo de los años este índice se ha ido modificando. En la sección 6 de este trabajo se encuentra la descripción de como está constituido y las modificaciones que a lo largo de 10 años ha presentado el IMECA.

Tabla 4.2 Variables que manejan los diferentes índices de calidad del aire

ORIGEN	VARIABLES							MODO DE CÁLCULO				MANERA DE CÁLCULO			DESCRIPTOR DE CATEGORÍAS			
	CO	SOx	NOx	Ox	COH	PST	otros	A	B	C	D	1	2	3	A	B	C	No.
Literatura																		
Green's	X				X			X					X		X			5
M.U.R.C.					X		X	X				X			X			5
Combustion Products									X		X				X			NO
AQI	X	X	X	X		X			X			X			X			NO
PINDEX	X	X	X	X		X	X		X			X			X			NO
ORAQI	X	X	X	X		X		X				X		X				6
MITRE	X	X	X	X		X		X				X		X				3
EVI	X	X		X		X		X				X		X				3
STARAQ5	X	X	X	X	X	X	X		X		X			X				4
CANADIAN	X	X	X	X	X	X	X	X				X		X				NO
SUAQUI	X	X	X	X		X		X			X			X				6
SUAQI	X	X	X	X		X		X			X			X				
PSI	X	X	X	X		X		X			X			X				6
UNIPEX	X	X	X	X		X		X			X			X				
IMEXCA	X	X	X	X		X		X			X			X				
IMECA	X	X	X	X		X		X			X			X				

## 5.- MARCO TEÓRICO

### **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PARA LOS CUALES EXISTEN LOS CRITERIOS Y NORMAS PRIMARIAS DE CALIDAD.**

En este capítulo se hace una recopilación de cada uno de los contaminantes criterio incluidos en el IMECA, explicando la acción que ejercen cada uno de ellos sobre nuestro ambiente y los efectos que de estos se generen en los seres vivos.

El conocer cuales son los cambios que sobre nuestra salud y medio ambiente se generan al elevarse los niveles de concentración de los diferentes contaminantes, obliga a crear: medios de información adecuados, fomentar una responsabilidad de respeto al medio y tomar medidas de acción, que evite poner en riesgo a la población que se encuentre expuesta a ellos.

#### **5.1 PARTÍCULAS TOTALES EN SUSPENSIÓN. (PST)**

Las partículas que comúnmente encontramos suspendidas en la atmósfera están compuestas por una gran variedad de sustancias, entre las que destacan los fluoruros, los compuestos de berilio, plomo y asbestos son algunos ejemplos. Propiedades como tamaño, composición química afinidad por el agua, difusión y absorción de luz, tendrán efectos en la salud de la población en general y percepción de la contaminación se describen a continuación.

A continuación se enlistan las características, propiedades y efectos de las partículas totales en suspensión en el siguiente orden:

- A.- Características y fuentes de origen de las partículas
- B.- Propiedades físicas de las partículas
- C.- Propiedades químicas de las partículas.
- D.- Efectos a la salud producidos por las partículas.
- E.- Efectos en la vegetación producidos por las partículas
- F.- Efectos en la atmósfera producidos por las partículas.

#### **A.- Características y fuentes de origen de las partículas**

La contaminación del aire por partículas, se refiere a cualquier material sólido o líquido (aerosol) que se encuentre suspendido en el aire y su tamaño varíe entre fracciones de  $\mu m$ , hasta los 500  $\mu m$  de diámetro.



Los contaminantes tienen dos fuentes de origen, una es natural y la otra es antropogénica; es decir generada por la actividad humana.

*Las partículas de origen natural.*- Son partículas mayores a  $10\mu\text{m}$  que frecuentemente son el resultado de procesos mecánicos como la erosión, el viento, cambios de temperatura, las dispersadas por causas volcánicas, etcétera.

*Las partículas antropogénicas.*- Son producidas generalmente por procesos de combustión e industriales principalmente:

**a) Siderúrgicas .-** Emiten partículas de diversos tamaños que oscilan entre los 40 a  $0.1\mu\text{m}$  inclusive hasta de menor diámetro y su composición química es como promedio :

Óxido férrico	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	89.1 %
Óxido ferroso	$\text{FeO}$	1.9 %
Óxido de silicio	$\text{SiO}$	0.9 %
Óxido de Aluminio	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.5 %
Óxido de Manganeso	$\text{MnO}$	0.6 %
Álcalis		1.4 %
Óxido fosfórico	$\text{P}_2\text{O}_3$	0.5 %
Azufre	$\text{S}$	0.4 %

**b) Incineradores.-** Como promedio las partículas emitidas tienen un diámetro menor a  $0.5\mu\text{m}$  y generan de 0.5 a 15 % de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y el 80 % restante puede ser: óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de silicio ( $\text{SiO}$ ), óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), níquel ( $\text{Ni}$ ), vanadio ( $\text{V}$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Zinc ( $\text{Zn}$ ), óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) y bario ( $\text{Ba}$ ).

**c) Las manufactureras de ácido sulfúrico.-** Estas plantas emiten óxidos de nitrógeno, ácido sulfúrico, bióxido y trióxido de azufre, formando neblinas.

**d) Fábricas cementeras.-** Las partículas emitidas tienen un diámetro que va desde los 25 a  $60\mu\text{m}$  y los compuestos emitidos son: óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de silicio ( $\text{SiO}$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), óxido de manganeso ( $\text{MnO}$ ), óxido cuproso ( $\text{CuO}$ ) y azufre ( $\text{S}$ ).

**e) Vehículos de combustión interna.-** Las partículas emitidas por vehículos de combustión interna presentan componentes de: plomo, partículas de carbón, aceites de motor y productos no volátiles formados por los aceites en la zona de combustión. La reacción produce compuestos de alto peso molecular como: olefinas, aldehídos, cetonas y ácidos libres. El plomo proviene principalmente como clorobromuro de plomo 2 ( $\text{PbClBr}$ ) en sus formas alfa y beta. Por litro consumido se emiten de 40 a  $52\mu\text{g}$  de partículas menores a

$2\mu\text{m}$  (Air Quality Criteria for Particulate Matter, 1969 y Chow, 1995).

## B.- Propiedades físicas de las partículas

Las propiedades físicas de las partículas en suspensión han sido agrupadas en propiedades de: (Air Quality Criteria for Particulate Matter, 1969 y Chow, 1995)

- a) Superficie
- b) Movimiento
- c) Ópticas

a) *Propiedades de superficie.*- Estas propiedades incluyen como las más importantes a la adsorción, la nucleación y la adhesión.

- ♦ La adsorción se considera como el impacto de las partículas individuales sobre la superficie de otras partículas. Según sea la velocidad del impacto y el tipo de este puede haber una acumulación de gas cerca de la partícula pudiendo generar interacciones entre el gas y la partícula (Quimioadsorción).
- ♦ La nucleación se presenta en concentraciones sobresaturadas de vapor, donde las gotas o cristales que se formen pueden ser absorbidos por la superficie de las partículas, constituyendo pequeños núcleos.
- ♦ La adhesión es una evidencia que sugiere que las partículas sólidas con un diámetro menor a  $1 \mu\text{m}$  siempre se van a adherir al chocar con otra partícula igual o mayor a ella.

b) *Propiedades de movimiento.*- Su movimiento está clasificado en relación al tamaño de las partículas. Las partículas menores a  $0.1 \mu\text{m}$  presentan movimiento Browniano que es similar al de moléculas gaseosas. Las partículas mayores a  $1.0 \mu\text{m}$  tienen velocidades significativas de depósito y está determinadas por el aire de donde se emitieron y su tamaño.

c) *Propiedades ópticas.*- El comportamiento de las partículas trae una disminución en la visibilidad y se produce por dos efectos ópticos. Uno es, la atenuación de los contornos de los objetos observados al incidir en ellos la luz; actuando como un suavizador de contornos. El otro efecto es la degradación de los contrastes entre el objeto y sus alrededores.

La distribución de las partículas será de acuerdo a su tamaño, por ejemplo: la figura 5.1.1 muestra la distribución de las partículas encontradas en la atmósfera según su diámetro aerodinámico. Las partículas que presentan propiedades de *nucleación* son aquellas cuyos diámetros aerodinámicos serán menor que  $\sim 0.08 \mu\text{m}$  y son emitidas directamente por procesos de combustión o por la condensación de gases enfriados tan pronto como son emitidos, el tiempo de permanencia de estas partículas en la atmósfera es menor a una hora porque rápidamente se coagulan para formar partículas más grandes o sirven como núcleos en la formación de nubes o neblinas. El rango denominado como *acumulación* consiste de partículas cuyos diámetros aerodinámicos oscilan entre  $0.08$  y  $\sim 2 \mu\text{m}$ . Estas partículas son el resultado de la coagulación de partículas menores emitidas por fuentes de combustión. La nucleación y condensación tienden a constituir las partículas denominadas como "Partículas finas" y dentro de este rango encontramos: ácido sulfúrico, bisulfato de amonio y carbón orgánico. Las partículas mayores a  $\sim 2$  ó  $3 \mu\text{m}$  son llamadas "partículas granulares" y están constituidas por partículas fragmentadas de origen geológico (erosión), polen y las esporas. (Lundgren y Burdon, 1995).

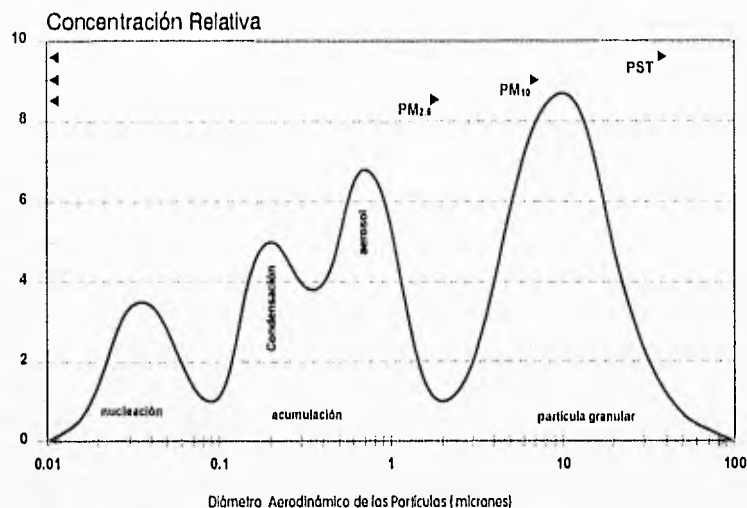


figura 5.1.1.- Distribución de las partículas en el aire ambiental según su tamaño. Las fracciones de PST y las PM<sub>10</sub> han sido monitoreadas para determinar las normas dadas por el National Ambient Air Quality Standards. (Fuente: Chow J. . Mayo 1995).

### C. Propiedades químicas de las partículas.

Al estar las partículas constituidas por una amplia variedad de sustancias, se dificulta la especificación de las propiedades del contaminante en particular. Lo que podemos generalizar son factores de: (Air Quality Criteria for Particulate Matter, 1987).

- temperatura
- humedad
- estados físicos
- interacción con el SO<sub>2</sub> y otros gases

### D. Efectos a la salud producidos por las partículas.

Estudios epidemiológicos han determinado la relación entre concentración ambiental e indicadores de salud como son: admisiones en hospitales, frecuencia de enfermedades respiratorias, reducción de capacidad pulmonar y decesos... (Chow J. . Mayo 1995).

Insistiendo en que el término partícula incluye a una serie de sustancias que se encuentran suspendidas en el aire, esto nos lleva a clasificar a las partículas según la región de depósito dentro del tracto respiratorio, (figura 5.1.2) lo cual va a ir muy relacionado con el tamaño de las partículas con los mecanismos fisiológicos y patológicos de los individuos expuestos. Dichos mecanismos se clasifican en: (Air Quality Criteria for Particulate Matter, 1969).

- 1.- Formas de depósito y limpieza del tracto respiratorio.
- 2.- Mecanismos de toxicidad:
  - a) Por su depósito extratorácico.
  - b) Por su depósito traqueobronquial.
  - c) Por su depósito pulmonar (alveolar),
  - d) Por su depósito torácico
- 3.- Daño morfológico.
- 4.- Carcinógenos.

### 1.- Formas de depósito y limpieza del tracto respiratorio

Se han hecho evaluaciones de los mecanismos de inhalación de las partículas y como ellas pueden afectar a la salud humana, por lo que se debe reconocer la importancia de los mecanismos de depósito y de limpieza en el tracto respiratorio. Las regiones del tracto respiratorio son cuatro (Extratorácica ET, Traquebronquial TB, Alveolar AL y Torácica TB+AL) y difieren marcadamente en estructura, área, función y sensibilidad o respuesta hacia las partículas en ellas depositadas.. Ver tabla 5.1.1 y figura 5.1.3.

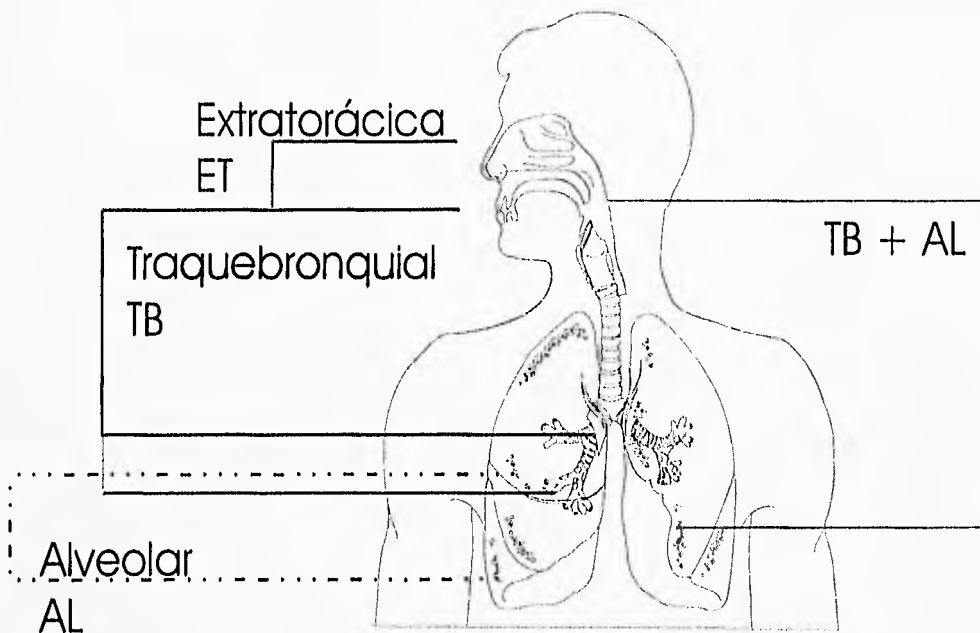


figura. 5.1.2 Principales características anatómicas del aparato respiratorio

Existen tres mecanismos de depósito en la deposición de las partículas en el tracto respiratorio que son: Impacto por Inercia, sedimentación y difusión. La tabla 5.1.2., nos muestra las características naturales de los mecanismos.

En la figura 5.1.3. se muestran los diferentes sitios de deposición de las partículas, así como los mecanismos de limpieza de las partículas inhaladas **(D1.- Partículas Inhaladas, D2.- Material exhalado, D3, D4, D5.- partículas depositadas, a)** depósito de material en región nasofaringea y va a sistema circulatorio, **b)** limpieza rápida de partículas, mecanismos ciliares actúan en la formación de moco toma ruta **d)**, **c)** absorción rápida, va a sistema circulatorio, **d)** limpieza ciliar rápida, va a tracto gastrointestinal, **e)** translocación directa de región pulmonar a la sangre, **f)** limpieza relativamente rápida depende de macrófagos que se puedan obtener, **g)** limpieza secundaria más lenta de partículas, va hacia el sistema linfático, **i)** Camino secundario de limpieza de h son introducidos a sistema sanguíneo y **j)** absorción colectiva de material eliminado del tracto.

Tabla 5.1.1. Regiones de depósito y limpieza de partículas en el tracto respiratorio

Región	Descripción de lo zona	Tamaño de partículas	Mecanismos de depósito	Mecanismos de limpieza	Tiempo de limpieza
Extratorácico (ET)	Cabezo, faringe y laringe inclusive	$>100 \mu\text{m}$ a tamaño de aerosoles higroscópicos. $>0.3 \mu\text{m}$	Impacto	Acción mucociliar, estornudo, exhalar fuertemente	minutos
Troqueobronquial TB	Desde los conductos ciliados de la tráquea hasta la región ciliada de los bronquios	$0.2 - 10 \mu\text{m}$	Impacto, sedimentación e Intercepción (fibroso)	Acción mucociliar, esputar, disolución a la sangre a través de un flujo a de mucosidad	horas - días
Alveolar o pulmonar (AL)	Región de intercambio gaseoso; bronquiolos, ductos alveolares y sacos alveolares	$<3 \mu\text{m}$	Difusión ( $<1 \mu\text{m}$ ) Sedimentación Impacto ( $>2 \mu\text{m}$ )	Fagocitosis a la región TB. Disolución a la sangre a través de un flujo o da otras	semanas - años
Torácico (TB +AL)					

Fuente: Air Criteria Particulate Matter, 1969 ; Chow J. 1995 y Federal Register, 1987)

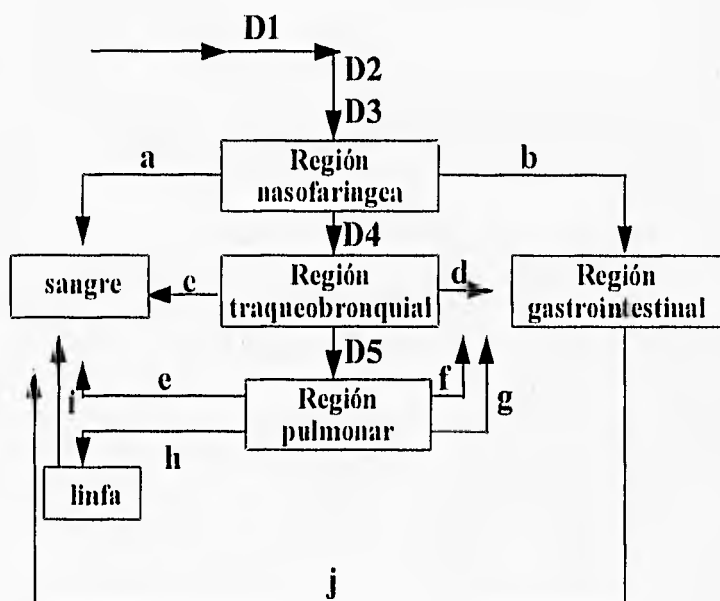


figura: 5.1.3 Sitios de depósito de partículas y mecanismos de limpieza

Fuente: Air Criteria for Particulate Matter, 1969)

## 2.- Mecanismos de toxicidad

Los estudios toxicológicos han demostrado que la acción de las partículas pueden provocar respuestas fisiológicas o patológicas por medio de tres caminos: (Air Criteria for Particulate Matter, 1969, Schurer y Haythorn, 1937)

- ✓ primero, las partículas pueden ser intrínsecamente tóxicas;
- ✓ segundo, la presencia de partículas inertes en el tracto respiratorio que puedan interferir con la limpieza de otros materiales tóxicos y
- ✓ tercero que las partículas actúen como acarreadores de materias tóxicas.

Existen evidencias que la presencia de partículas pueden ocasionalmente reducir la toxicidad de un segundo contaminante.

Existen cuatro mecanismos de toxicidad que alteran la salud del individuo que son:

- a) Mecanismos de toxicidad química
- b) Alteraciones de los mecanismos de defensa
- c) Daños directos o indirectos
- d) La toxicidad sistemática

a) *Mecanismos de toxicidad química.*- son mecanismos de irritación de tejidos o de receptores nerviosos según el lugar de depósito. Esto puede ser al momento o se puede producir posteriormente por acumulaciones de sustancias. Estas sustancias pueden ser tan diversas como los aerosoles ácidos, polvos gruesos e insolubles y combinación de partículas con SO<sub>2</sub> en aerosol.

b) *Alteraciones de los mecanismos de defensa.*- esto puede resultar en un incremento en la susceptibilidad a las infecciones y en un desarrollo potencial de enfermedades pulmonares crónicas. Los aerosoles ácidos y polvos insolubles afectan la velocidad de eliminación al alterar los patrones de depósito, así aumenta la secreción mucosa y afecta las propiedades físico-químicas del moco. Ciertas partículas pueden dañar a los macrófagos alveolares.

c) *Daños directos o indirectos.*- son cambios morfológicos que pueden potencialmente agravar o desarrollar alguna enfermedad pulmonar existente. Entre éstos tenemos los aerosoles ácidos, que pueden producir daño directo a los tejidos, los polvos gruesos principalmente los silicatos, que indirectamente dañan a través de los macrófagos.

d) *La toxicidad sistemática.*- se produce por partículas que puedan ser transportadas y producir efectos en otras áreas del cuerpo, por ejemplo: el plomo y sustancias carcinogénicas.

## 3.- Daño morfológico

Los efectos producidos por las partículas en la atmósfera se discuten en término de estudios epidemiológicos por la relación de las partículas con otros contaminantes atmosféricos como es el SO<sub>2</sub> y pocos son los estudios epidemiológicos adecuados para independizar los efectos de cada uno de los dos contaminantes.

Los estudios epidemiológicos evalúan la información de los efectos en personas expuestas a la contaminación ambiental.

Es importante la estrecha relación que presentan los humos y las partículas de carbón; estudios realizados por Schnurer y Haythorn demostraron la relación entre el humo y las partículas de carbón en ratas y conejos, para esto expusieron a los animales durante un período de 80 días a una concentración de  $4410 \mu\text{m} / \text{cm}^3$  de humos y carbón, unos conejos murieron antes de terminar el experimento a consecuencia de una neumonía bronquial. Al finalizar los 80 días se realizó una necropsia en algunos de los animales mostrando lesiones típicas de antracosis no ocupacional en los pulmones, y formación de banda de colágeno alrededor de los depósitos de carbón.

Los otros animales fueron examinados 429 días después y los observadores notaron un grado leve de pneumoconiosis bituminosa en los pulmones, esto, era análogo a los observados en los mineros de minas de carbón. De esta manera concluyeron que la neumonitis y fibrosis que presentan los trabajadores de las minas se debía más a la presencia del carbón que a las pequeñas concentraciones de sílice presentes en las minas.

Los estudios fisiológicos han demostrado que las partículas son irritantes pulmonares.

#### *4.- Carcinogénesis*

La incidencia de cáncer y la actividad de las células malignas junto con ciertos factores ambientales han creado un incremento de individuos susceptibles a contraer el cáncer pulmonar.

En varias partes del mundo en donde existen datos estadísticos, por ejemplo, en los EE.UU., donde la mortalidad relativa debido al cáncer pulmonar ha estado incrementándose, siendo los residentes de zonas urbanas los que presentan una mayor incidencia en comparación con los habitantes de zonas rurales. La asociación entre el cáncer pulmonar con los estudios hechos a fumadores de cigarrillos y la contaminación del aire presentan características en común.

Existen relaciones entre el material suspendido en la atmósfera y el desarrollo de tumores pulmonares, sustancias tales como los hidrocarburos aromáticos polinucleares (Benzo pireno (BaP)) pueden producir cáncer pulmonar en el hombre.

Sin embargo en animales de laboratorio se ha observado un incremento en la incidencia e tumores, que asociados a partículas específicas o infecciones víales pueden volverse malignos.

Una parte del material orgánico presente en la atmósfera como parte de las partículas suspendidas pueden ser carcinogénas y han sido identificadas en casi todas las grandes ciudades en donde se han hecho los estudios.

La combustión incompleta de la materia orgánica es una de las principales fuentes de tales sustancias. Experimentalmente la reacción fotoquímica de los constituyentes alifáticos y aromáticos de la gasolina en presencia de gases atmosféricos poseen la capacidad de generar tumores .

## **E.- Efectos en la vegetación producidos por las partículas.**

La mayoría de las investigaciones están relacionadas con los efectos directos de polvos sobre las hojas, ramas y flores en contraposición a los efectos indirectos de la acumulación de partículas en suelo.

El campo de investigación es muy incompleto debido a la variedad de sustancias que componen a las partículas, lo que ha hecho estudiar los efectos específicos en lugar de los encontrados normalmente en la atmósfera.

Existen evidencias de daños generados por partículas emitidas por fábricas cementeras; los compuestos lanzados ahí en presencia de agua o simplemente de la humedad ambiental, se cristalizan formando una capa que se adhiere al haz de la hoja dañando los tejidos de la planta e inhibiendo su crecimiento; el mecanismo de daño se desconoce todavía, pero es posible que esta capa intercepte la luz necesaria para que la planta disminuya su proceso de fotosíntesis y por lo tanto la formación del almidón como sustancia de reserva, esto también provoca un cambio en el pH de la planta dejándola susceptible a los ataques de las plagas.

Se han encontrado la presencia de partículas fluoradas que aparentemente no le producen daño alguno a las plantas, pero estas al ser ingeridas por los animales crean problemas graves de toxicidad. (Croja, 1966, y Pierce, 1960).

## **F.- Efectos en la atmósfera producidos por las partículas**

La presencia de las partículas suspendidas en la atmósfera juegan un papel importante en el comportamiento y determinación del clima. Los efectos más importantes que se efectúan sobre la atmósfera son:

- *La reducción de la radiación solar neta de la superficie terrestre.* esto puede conducir a una reducción en la temperatura en áreas locales o regionales y finalmente alterar el clima. También tiene una tendencia en aumentar la turbidez atmosférica lo que afecta a la visibilidad.
- *El aumento de la formación de nubes y de niebla,* lo que posiblemente hace que aumente la precipitación. Se debe a el tipo de partículas existentes en el medio ambiente y provocan la precipitación, en contraste con aquellas que pueden actuar como núcleos higroscópicos (mayores a  $1 \mu\text{m}$ ) los cuales son formadores de nubes.



Tabla 5.1.2 Posibles respuestas a las deposiciones de las partículas en el tracto respiratorio

Región de depósito	Mecanismos potenciales	Efectos Potenciales/ Observaciones
Extralorácica (ET)	Irritación química y mecánica. Estimulación de receptores por material depositado	Efectos sintomáticos: - Resequedad de la nariz, boca y garganta. - Estornudos y rinitis.
	Inhibe o detiene la acción mucociliar por la acción del polvo.	- Cáncer nasal (Trabajadores de madera)
	Se intensifica la deposición en la laringe	- Cáncer en la laringe (Fumadores)
Traqueobronquial (TB)	Irritación química y mecánica- la estimulación resulta en una broncoconstricción producida por: - Polvos inertes ( hulla en polvo, carbonato de calcio e hidróxido de fierro). - Polvo urbano suspendido (sulfatos y partículas volátiles que con la humedad forman costras) - Polvos orgánicos comunes, alérgenos (granos de polen, mohos, etc.) - Aerosoles ácidos finos (ac. sulfúrico, bisulfato de amonio) - Aire de una zona contaminada con Pb. - Finos partículas en combinación con SO <sub>2</sub>  Se intensifica la sensibilidad a agentes broncoconstructores subsecuentes como el ac. sulfúricos  Los aerosoles ácidos generan un daño directo a los tejidos	-Disminución de funciones respiratorias Se incrementan las dificultades en la respiración, las enfermedades del corazón y del pulmón se agudizan. Incluyendo:  - Asma - Bronquitis - Enfisema y enfermedades cardiovasculares - Influenza  - Incrementa la deposición de partículas finas  - Como arriba  - Producen lesiones bronquiales
	Se altera el tiempo de limpieza, incrementa la producción de mucosidad por material depositado (por fumar, por ac. sulfúrico por polvos)	Posible desarrollo de bronquitis por exposiciones repetidas al ac. sulfúrico. - Se aumentan las posibilidades de que los personas expuestas a la contaminación en un sector comunitario contraigan bronquitis. - En trabajadores expuestos al polvo de la hulla y otros derivados del carbón se incrementan las posibilidades de contraer bronquitis.
	Las deposiciones son incrementadas en las bifurcaciones bronquiales y retarda el tiempo de limpieza.	El incremento en las deposiciones genera un aumento de carcinomas broncogénicos.
Traqueobronquial (TB)	Existe interacción entre los carcinógenos y las partículas ambientales.	La producción de tumores intratraqueales generados por: carbón, fierro mineralizado y asbestos. Se incrementa el cáncer de pulmón entre gente de la ciudad que entre los fumadores rurales.
Pulmonar (alveolar) (AL)	Decrece el transporte de oxígeno y probablemente se incrementa el flujo sanguíneo a través de los capilares pulmonares.	La agravación de enfermedades cardiovasculares están asociados con los contaminantes de las ciudades.
	La muerte de macrófagos como resultados de una liberación de enzimas proteolíticas que dañan el tejido alveolar, producido por silicatos y polvos derivados del carbón.  Daño a tejidos por aerosoles	Pnuemoconlosis - Habitantes de zonas áridas (desiertos) - Polvo agrícola a granjeros - Polvos en animales de zoológicos. - Silicatos en trabajadores de granito. - Polvos de hulla en los mineros - Fibrosis por exposiciones a osbestos.  Incrementa la susceptibilidad a las infecciones. - Incremento en la mortalidad de ratones expuestos a aerosoles de Cd y Ni. - Pérdida de área alveolar (enfisema) por ac. sulfúrico

Región de depósito	Mecanismos potenciales	Efectos Potenciales/ Observaciones
	Exposición de efectos combinados y una limpieza lenta de partículas	Acumulación de pigmentos en los pulmones de partículas inhaladas. Posible papel que juega la contaminación en una comunidad que pueda ser causa de un emfisema pulmonar.
Torácica (No específico a TB, AL)	<p>Efectos posibles en mecanismos de defensa (Limpieza e inmunología). Promoción de infecciones</p> <p>Medidas consecutivas de la función respiratoria han mostrado daño pulmonar en la niñez producidas por infecciones respiratorias.</p> <p>Absorción de tóxicos sistémicos (pesticidas, elementos carcinógenos). Resultando en daños extra respiratorias. La mayor eficiencia en la absorción por deposición alveolar</p>	<p>Incremento de infecciones en la parte baja del tracto respiratorio en niños. - Incrementa la tasa de influenza.</p> <p>Persisten cambios en aquellos niños con gran velocidad de infección al estar expuestos a las materias particuladas.</p> <p>Efectos del plomo en sistema nervioso y hematopoyética. Cáncer gastrointestinal</p>

Fuente: Air Criteria for Particulate Matter, 1969

## 5.2 ÓXIDOS DE AZUFRE

Aunque el azufre forma diversos óxidos, únicamente dos de ellos son los más importantes por su contribución a la contaminación ambiental; el bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ).

A continuación se describen las principales características, propiedades, efectos y relación de los óxidos de azufre con otros contaminantes atmosféricos.

### A.- Características y fuentes de origen de los óxidos de azufre.

El bióxido de azufre es un gas incoloro que puede ser detectado por su sabor en concentraciones entre los  $1000$  y  $3000 \mu\text{g} / \text{m}^3$  (0.35 a 1.05 ppm). En concentraciones más altas de  $10\ 000 \mu\text{g} / \text{m}^3$  (3.5 ppm) tiene un olor caústico irritante. Se disuelve con facilidad en agua para formar ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) el cual se oxida lentamente y forma ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) con el oxígeno del aire. En presencia de catalizadores como las sales de manganeso o hierro se convierte en ácido sulfúrico con mayor rapidez. (Babor, 1979)

*Fuentes Naturales* - Los compuestos de azufre se encuentran en pequeñas cantidades en el aire ambiental aún en zonas alejadas de zonas urbanas como resultado de procesos naturales. En fase gaseosa el  $\text{SO}_2$  y el ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) son emitidos por los volcanes, las bacterias anaeróbicas del suelo, mares, y pantanos; como sulfatos en los litorales, por erupciones volcánicas y neblinas.

*Fuentes Antropogénicas* - La mayoría del azufre que se emite se encuentra en forma de  $\text{SO}_2$  como el resultado del uso de combustibles fósiles con contenidos en azufre para la producción de energía y calefacción, la refinación y procesamiento del petróleo, la fundición mineral como la del cobre, la industria papelera etcétera. Todos éstos emiten importantes cantidades de  $\text{SO}_2$  y otros derivados del azufre. Lo mismo ocurre con la combustión del energético utilizado en las plantas termoeléctricas que forman  $\text{SO}_x$  en proporciones de 40 a 80 partes de  $\text{SO}_2$  a una de  $\text{SO}_3$ .

El  $\text{SO}_2$  es eliminado en parte por mecanismos de absorción sobre las superficies terrestres, generalmente en el agua y la vegetación. El resto sufre transformaciones químicas dando lugar a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y / o sulfatos que son depositados por precipitación seca o pluvial este último es el fenómeno que genera la lluvia ácida. (Air Criteria for Sulfur Dioxide, 1976)

### B.- Propiedades físicas de los óxidos de azufre.

Los óxidos de azufre son gaseosos en su mayoría, son no inflamables, no explosivos e incoloros. (Babor, 1979)

#### 1.- Propiedades físicas del bióxido de azufre.

El bióxido de azufre en el aire es detectado por su sabor en concentraciones cercanas a 0.3 ppm a 1.0 ppm; en concentraciones de 3.00 ppm tiene un sabor picante y olor irritante para la mayoría de las personas.

Su solubilidad en agua del bióxido de azufre decrece al aumentar la temperatura. Ver tabla 5.2.1.

Tabla 5.2.1.- Propiedades físicas del Bióxido de azufre

Peso Molecular	64.06	UMA
Volumen Molecular	44.00	ml
Densidad del Gas	2.92	g/l a 0°C y 1 atm
Densidad del Líquido	1.46	g/cm <sup>3</sup>
Punto de Ebullición	-10.02	°C
Temperatura Crítica	152.2	°C
Presión Crítica	77.7	atm
Calor de Formación	70.92	Kcal/mol
Calor de Vaporización	5.96	Kcal/mol
Viscosidad	0.0039	dyne sec /cm <sup>2</sup> a 0°C
Constante de Ebullición molecular.	1.45	°C/1000g

## 2.- Propiedades físicas del trióxido de azufre

Existe en los tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso; se puede encontrar como un polímero (SO<sub>3</sub>)<sub>n</sub>. Al incrementar la temperatura se aumenta la proporción de monómero, hasta alcanzar la temperatura de ebullición de 44.5°C, produciendo un vapor por moléculas totalmente sencillas. Ver tabla 5.2.2

Tabla 5.2.2.- Propiedades físicas del Trióxido de azufre

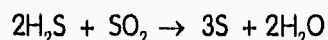
Temperatura crítica	218	°C
Peso Molecular	72.06	UMA
Presión Crítica	83.6	atm
Punto de Ebullición	44.5	°C
Calor de Formación	94.45	Kcal/mol
Densidad del Líquido	1.904	g/cm <sup>3</sup>
Calor de disolución en agua	39.16	kcal

## C.- Propiedades químicas de los óxidos de azufre.

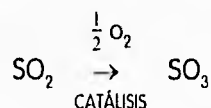
### 1.- Propiedades químicas del bióxido de azufre.

Bajo condiciones ambientales el SO<sub>2</sub> es un gas estable que puede actuar como: agente reductor o agente oxidante.

En estado gaseoso el SO<sub>2</sub> oxida al ácido sulfhídrico para formar agua y azufre. Esta reacción es conocida como la Reacción de Claus:



Como agente reductor el gas reacciona lentamente con el oxígeno (O<sub>2</sub>) a 400°C para producir SO<sub>3</sub>, pero la oxidación catalítica del SO<sub>2</sub> se presenta a temperatura ambiente:

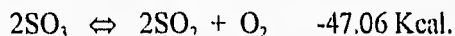


La importancia del bióxido de azufre como contaminante es la capacidad de reaccionar fotoquímicamente o catalíticamente con otros compuestos o elementos de la atmósfera para formar: ácido sulfuroso, trióxido de azufre, ácido sulfúrico, sales de ácido sulfúrico y sulfatos.

## 2.- Propiedades químicas del trióxido de azufre.

Este compuesto se obtiene a temperatura ambiente utilizando al oxígeno como el agente reductor a partir del bióxido de azufre.

El calor de formación del SO<sub>3</sub> es mayor que el del SO<sub>2</sub>. Este último es más estable al calor que el trióxido de azufre, el cual al calentarse se disocia en dióxido de azufre y oxígeno.



Al combinarse con agua da ácido sulfúrico. Se une también con otros óxidos de muchos metales para dar lugar a los sulfatos.

## D.- Efectos a la salud producidos por los óxidos de azufre.

El SO<sub>2</sub> es el contaminante más estudiado por sus efectos a la salud a corto y largo plazo y por sus reacciones atmosféricas por la producción de bisulfitos, sulfitos y sulfatos, éste es cerca de 30 veces menos tóxico e irritante que los otros derivados de azufre. (Air Criteria for Sulfur Dioxide, 1976)

Se ha observado que el SO<sub>2</sub> inhalado pasa del aparato respiratorio a la corriente sanguínea donde se difunde por todo el cuerpo, hasta que este por algún mecanismo fisiológico parece ser metabolizado y excretado por vías urinarias.

Cralley (1942) estudió los efectos de este gas en la tráquea de conejo y su relación con los efectos producidos en el ser humano. La temperatura y humedad fueron controlados al igual que la cantidad de SO<sub>2</sub> inhalada. Su objetivo era la de buscar el tiempo necesario para el cese de la actividad ciliar en la tráquea. El tiempo que se produjo el cese fue de 10 minutos a una concentración de 18 ppm a 20 ppm, y los valores encontrados que causan irritación inmediata en la garganta del ser humano es de 8 ppm a 12 ppm en ese mismo tiempo.

Observaciones de laboratorio han mostrado que la mayoría de los individuos muestran una respuesta de percepción al SO<sub>2</sub> a concentraciones por arriba de 5ppm (~14mg /m<sup>3</sup>) manifestándose con severos casos de broncoespasmos.

En personas sensibles se ha detectado una respuesta a concentraciones de 1 ppm a 2ppm ( ~3mg /m<sup>3</sup> a 6mg/m<sup>3</sup> ). Aunque no se produjeron los broncoespasmos tan severos en estas personas.

Cuando el contaminante está en forma de ácido sulfúrico se ha demostrado que es más irritante que el SO<sub>2</sub> y sus efectos están relacionados con el tamaño de las partículas.

La mortalidad se incrementa en personas con enfermedades cardíacas y pulmonares, al ser expuestas al efecto sinérgico del bióxido de azufre con las partículas suspendidas aún en bajas concentraciones. Asimismo, personas sanas al estar bajo las mismas condiciones pueden padecer daños respiratorios que pueden ser agudos o crónicos. Los daños agudos que se perciben de inmediato son: disminución en la frecuencia respiratoria, broncoconstricción, asma, sinusitis, neumonías, cronaxie óptica, sensibilidad del ojo y del ritmo alfa (detectado por medio del electroencefalograma). Ver tabla 3.2.3, fig. 5.2.1. (Bushueva,1962)

Tabla 5.2.3.- Umbrales de Concentración para SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y sus combinaciones

Umbrales de concentración				
Productos usados	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +SO <sub>2</sub>	
	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	
Efectos y Percepción del olor	600 - 500	1.600 - 2600	> 300	500
Adaptación por el ojo a la oscuridad	630 - 730	920	>300	500
Cronaxie óptica	730 -	1.500	600	1.200
Reflejo condicionado	400 -	600	150	500

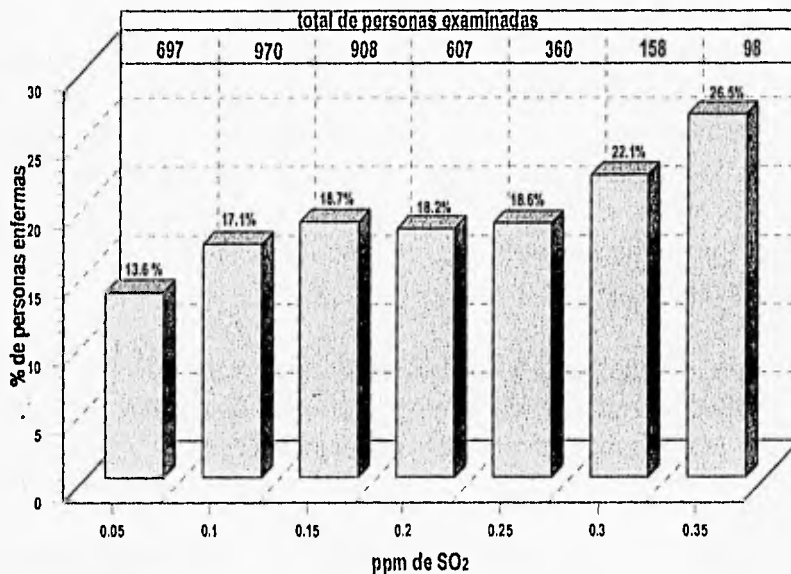


figura 5.2.1 Gráfica comparativa en pacientes con severas bronquitis crónicas (55 años de edad o más) al estar expuestos a siete niveles de SO<sub>2</sub> por 24 horas, durante los meses de Oct. - Nov. de 1967.

\*Fuente: Air Quality Criteria for Sulfur Dioxide 1976)

## E.- Efectos en la vegetación producidos por los óxidos de azufre

La respuesta de las plantas hacia este contaminante va relacionado a las características ambientales y la dosificación del contaminante. Los primeros síntomas que se presentan son en las hojas que al estar expuestas muestran en el margen y área intercostal como si estuvieran hechas a perder por un exceso de agua. Estas áreas se secan externamente y/o se decoloran. La abscisión puede presentarse después de algún tiempo. Esto sugiere que el  $\text{SO}_2$  actúa como un supresor del crecimiento y rendimiento de las plantas sin causar un daño aparentemente visible. (Air Criteria for Sulfur Dioxide, 1976)

La capacidad de la planta de transformar el  $\text{SO}_2$  absorbido en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y éste a su vez en sulfatos, va relacionado a una alta velocidad de absorción haciendo que los sulfitos se acumulen y se transformen en ácido sulfuroso el cual daña las células. El grado de daño depende de la velocidad de absorción que está en función de la concentración. Los daños crónicos son consecuencias de exposiciones largas a bajas concentraciones del contaminante, los efectos crónicos para concentraciones subletales de  $\text{SO}_2$  traen como consecuencia una decoloración o clorosis en la hoja, lo que sugiere que el nivel de daño es a nivel de los cloroplastos.

En hojas con daño crónico se ha observado una gran cantidad de sulfatos acumulados en los tejidos, pero parece que esto no le crea un daño inmediato. El ácido sulfúrico que se obtiene de la oxidación e hidrólisis en el tejido se metaboliza rápidamente por las bases orgánicas. Esto hace que los ácidos formados en las hojas puedan reducir su capacidad buffer sin cambiar su pH, pero cuando esta capacidad buffer es superada se presenta la clorosis.

La alfalfa es una de las plantas más susceptibles de sufrir un daño agudo por  $\text{SO}_2$  a concentraciones de 1.25 ppm. por lo que es utilizada como una planta indicadora. Para determinar la resistencia de una planta a este contaminante, se efectúa una fumigación durante un período que va desde una a cuatro horas con una concentración suficiente de  $\text{SO}_2$  para causar daño foliar. Esto también va relacionado con la humedad relativa. Se dice que la cantidad de daño generado por una concentración dada de  $\text{SO}_2$ , varía con el grado o velocidad de absorción.

Existen factores externos que afectan la fitotoxicidad generado por el  $\text{SO}_2$  que son: temperatura, humedad relativa, intensidad luminosa, abasto de nutrientes, edad de la planta y el tejido expuesto. Esto se amplía a continuación: Ver tabla 5.2.4

*Temperatura.*- Una planta es mas resistente al bióxido de azufre a temperaturas inferiores a  $5^\circ \text{C}$ .

*Humedad relativa.*- Generalmente tiende a aumentar el daño al incrementarse la humedad relativa.

*Intensidad luminosa* .- Las plantas expuestas a una completa oscuridad son mas resistentes al  $SO_2$  , que las expuestas a intensidades de 300 candelas. Las plantas que crecen en la sombra y que posteriormente son expuestas a la luz son más susceptibles, que aquellas que crecen a pleno sol.

*Abasto de nutrientes*.- Si las plantas están en un medio donde existen carencias de nutrientes serán mas susceptibles, que aquellas que reciban los nutrientes adecuados.

*Edad de las plantas*.- Las plantas jóvenes y el follaje nuevo son mas resistentes al  $SO_2$  que las plantas y hojas viejas.

La niebla de ácido sulfúrico también daña a las hojas. Las gotas de  $H_2SO_4$  pueden causar daños de puntillero en hojas a concentraciones de  $0.1 \mu g/m^3$

Tabla 5.2.4.- Daños generados en plantas a diferentes concentraciones

Concentraciones	Tiempo	Nivel de daño
85 $\mu m/m^3$ (0.03 ppm)	Anual	Daño crónico a la planta y puede ocurrir una excesiva caída de las hojas.
860 $\mu g/m^3$ (0.3 ppm)	8 horas	Sólo algunas especies de árboles y hierbas son afectadas.
145 $\mu g/m^3$ a 715 $\mu g/m^3$ (0.05 a 0.25 ppm)	4 horas	Pueden reaccionar sinérgicamente con el $O_3$ ó el $NO_2$ , produce daños severos a plantas sensibles.

## F.- Efectos en la atmósfera producidos por los óxidos de azufre.

a) *Efectos del  $SO_2$  sobre la transmisión de la luz en la atmósfera*.- Uno de los efectos físicos mas notables del aire contaminado es la reducción de la visibilidad en la atmósfera contaminada. La contribución de la niebla de ácido sulfúrico y de otros sulfatos suspendidos para la disminución de la luz diseminada junto con la reducción de la visibilidad pueden ser estimados para datos sobre la concentración y distribución del tamaño de las partículas.

Generalmente existe una buena correlación entre las concentraciones de  $H_2SO_4$  o sulfatos y las concentraciones de  $SO_2$ . El incremento en la humedad resulta resulta en un incremento en la proporción de  $SO_2$  a ácido sulfúrico acompañado por un cambio del diámetro medio de las gotas de ácido sulfúrico. Relacionando este fenómeno de niebla tenemos también a las partículas suspendidas que junto con la humedad ambiental están relacionadas.

b) *Reacciones atmosféricas de los óxidos de azufre*.- La oxidación atmosférica del  $SO_2$  resulta en la formación del ácido sulfúrico y otros sulfatos que son del 5 al 20% del total de las partículas de sulfatos atmosféricos suspendidas. Esto determina que la reducción de la visibilidad es un factor importante en respuestas fisiológicas que van en relación al grado de penetración y retención de partículas en los pulmones.



## **G.- Relación del SO<sub>2</sub> con otros contaminantes atmosféricos**

a) *Efectos sinérgicos del SO<sub>2</sub> con el O<sub>3</sub>.*- Menser y Heggstad (Air Criteria for Sulfur Dioxide, 1976), demostraron que fumigando con una combinación de concentraciones subletales de SO<sub>2</sub> (0.24 ppm) y de O<sub>3</sub> (0.03 ppm) por dos horas se provocaba daño a las plantas de tabaco. Cuando el tiempo de exposición se duplicó (4hrs) el daño también se duplicó, pero no hubo el mismo resultado cuando se fumigaron las plantas con los contaminantes por separado. Heck en 1971 encontró que la mínima concentración sinérgica que produce daño a la planta de tabaco es de 0.03 ppm de O<sub>3</sub> y de 0.1 ppm de SO<sub>2</sub> actuando sinérgicamente.

b) *Efectos sinérgicos del SO<sub>2</sub> y las PST.*- Haciendo un análisis de daños obtenidos durante los episodios ocurridos en Londres se ve un incremento en el promedio de mortalidad diaria en los grupos de ancianos y en el de personas con enfermedades cardiovasculares crónicas.

Este incremento en la mortalidad se asocia con la elevación continua (24 hrs.) durante varios días sucesivos de los niveles de PST y del SO<sub>2</sub> en condiciones de una elevada humedad (niebla).

Al igual que en la relación sinérgica el SO<sub>2</sub> con el O<sub>3</sub> los daños que producen estos dos contaminantes son más agudos que los producidos por sí solos en una misma concentración.

### 5.3 OXIDANTES FOTOQUÍMICOS

La presencia de la radiación ultravioleta  $uv$  con los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) e hidrocarburos reactivos, son los precursores en la formación de los contaminantes secundarios, un ejemplo de estos son los llamados oxidantes fotoquímicos en donde destacan el ozono ( $O_3$ ) y los Nitratos de Peroxiacetilo (PAN). (Bravo, 1987; Air Criteria for Photochemical Oxidants 1970)

#### A.- Características y fuentes de origen de los oxidantes fotoquímicos

Los oxidantes fotoquímicos son nocivos a los sistemas biológicos provocando degradación en ciertos materiales.

*Fuentes naturales.*- En la atmósfera el ozono va estar presente en dos niveles, uno en la tropósfera que abarca desde la superficie hasta las 12 km de altitud, la otra capa es la estratósfera que se extiende desde una altitud de 18 km hasta aproximadamente los 40 km, su altitud está relacionada con latitud.

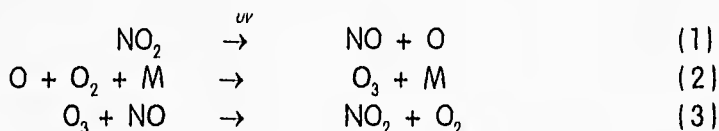
En la tropósfera el ozono se genera en la naturaleza por la acción de las descargas eléctricas sobre las moléculas de oxígeno ( $O_2$ ). Las concentraciones producidas no son mayor de  $100\mu g/m^3$  (0.05 ppm) en áreas no urbanas.

La estratósfera presenta una capa de ozono generada por la absorción de la luz ultravioleta por el oxígeno. Una insignificante parte de este ozono producido en esta capa llega a la superficie terrestre.

*Fuentes antropogénicas.*- Los oxidantes fotoquímicos son productos secundarios originados en grandes concentraciones por las reacciones entre los hidrocarburos (HC) y los óxidos de los nitrógeno ( $NO_x$ ) expuestos a la luz ultravioleta  $uv$  en presencia de un tercer cuerpo.

El ozono es un contaminante secundario formado en la atmósfera a través de una serie compleja de reacciones químicas de los contaminantes precursores ( $NO_x$  e HCNM) (Bravo, Sosa y Torres, 1988)

La absorción de la luz  $uv$  por el  $NO_2$  conduce a una serie de reacciones complejas donde la molécula de bióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) es fotolizada en óxido de nitrógeno (NO) y oxígeno atómico (O) ver ecuación 1. El ozono se forma en la siguiente reacción: el oxígeno atómico se une a una molécula de oxígeno generando  $O_3$ ; para que esto se efectúe, es necesario la presencia de un tercer cuerpo (M) que al colisionar con el O y el  $O_2$  se transfiera el exceso de energía que tiene el sistema. De no existir esta molécula la reacción es reversible, ver ecuación 2. Finalmente el  $NO_2$  se forma por la reacción entre el NO y el  $O_3$ . Ver ecuación 3. (Bravo, 1987)



De acuerdo a ciclo fotolítico el NO y el O<sub>3</sub> no pueden coexistir por mucho tiempo por su velocidad de reacción entre ellos y destruirse en las mismas cantidades, pero este ciclo (figura 5.3.1) puede alterarse por la intervención de ciertos hidrocarburos reactivos. Ver figura 5.3.2.

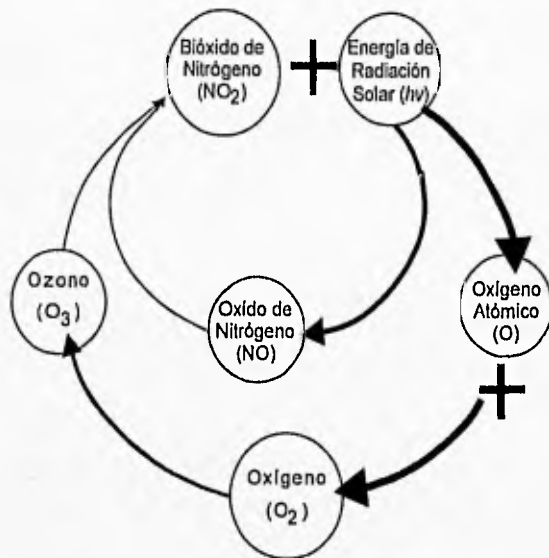


Figura. 5.3.1 Ciclo fotolítico de la formación del ozono  
Fuente: Bravo, Sosa y Torres 1988

### Interacción de Hidrocarburos con el ciclo fotolítico del NO<sub>2</sub>

Los hidrocarburos son emitidos a la atmósfera por:

- a) la deficiente combustión en los motores de los vehículos de combustión interna,
- b) por la industria ligera y pesada
- c) por el uso de solventes orgánicos.
- d) evaporación de tanques de almacenamiento, gasolineras, etc.

Se ha demostrado experimentalmente por las medidas atmosféricas registradas que indican a los hidrocarburos ser más afines en su reacción con el óxido de nitrógeno que el ozono, se ha estado incrementando en sus concentraciones en el aire. Ver figura 5.3.2.

Los NMHC emitidos a la atmósfera por la combustión de combustibles fósiles básicamente son: Olefinas e Hidrocarburos aromáticos. Estudios realizados muestran que el átomo de oxígeno reacciona con los NMHC oxidándolos y generando radicales libres que reaccionan con el NO para formar NO<sub>2</sub>. De esta manera el balance del ozono consumido por el NO está alterada haciendo que se incremente la concentración de ozono.

La participación de los hidrocarburos en el ciclo fotolítico del bióxido de nitrógeno provocan reacciones más rápidas y extensas con el NO.

Los átomos de  $O^{\cdot}$  y la molécula de  $O_3$  tienen gran capacidad para reaccionar por medio de la oxidación con los hidrocarburos reactivos; la oxidación de la molécula de oxígeno es muchas veces más rápida que la de ozono. Así los hidrocarburos se combinan más fácilmente con las moléculas disponibles del oxígeno atómico ( $O^{\cdot}$ ) provenientes de la descomposición del bióxido de nitrógeno, formando radicales libres, que oxidan el NO a  $NO_2$ , reiniciando con ello el ciclo. Ver figura 5.3.2.

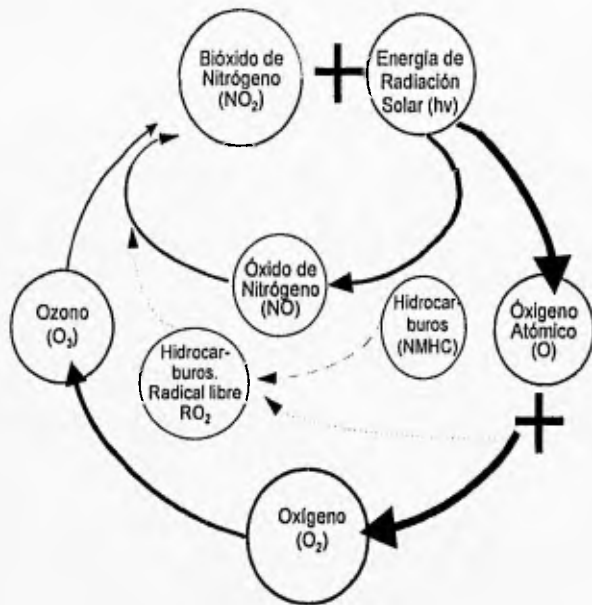


Figura. 5.3.2 Ciclo fotoquímico de interacción de moléculas en la formación del ozono  
Fuente: Bravo, Sosa 1 Torres 1988

## B.- Propiedades Físicas de los oxidantes fotoquímicos

Los oxidantes fotoquímicos que más frecuentemente se originan son:

- Ozono ( $O_3$ ).
- Nitratos de Peroxiacetilo (PAN)

### Propiedades físicas del ozono

Es la molécula triatómica del oxígeno, es diamagnética y explosiva.

Tabla 5.3.1 Propiedades físicas del  $O_3$

Estado físico		gas azulado
Peso Molecular	48.00	UMA
Fórmula química	$O_3$	
Punto de fusión	192.70	$\pm 0.2$ °C
Punto de ebullición	-111.90	$\pm 0.3$ °C
Solubilidad	0.494	ml/100 ml de agua a 0°C y 1 atm

## Propiedades físicas del PAN

Tabla 5.3.2 Propiedades físicas del PAN

Estado físico		líquido incoloro
Fórmula química	$\text{CH}_3 - \text{COONO}_2$ Ö	
Peso Molecular	121.00	UMA

## C.- Propiedades Químicas de los oxidantes fotoquímicos

El ozono se prepara por acción de una descarga eléctrica silenciosa sobre el oxígeno.

El ozono es un gas relativamente inestable a la temperatura ambiente y tiende a descomponerse según la siguiente ecuación:



Esto explica por que el ozono es más oxidante que la molécula de oxígeno a temperatura ambiente.

Aunque el oxígeno se combina prácticamente con todos los elementos, lo hace generalmente a temperaturas elevadas, mientras que el ozono se comporta como un agente oxidante poderoso, reaccionando con sustancias en condiciones en las cuales la molécula de oxígeno es inactiva.

## D.- Efectos a la salud producidos por oxidantes fotoquímicos

Los oxidantes fotoquímicos como: ozono, óxidos de nitrógeno y PAN, son gases que tienden a ejercer sus efectos tóxicos en el cuerpo al ser inhalados. Como resultados de la inhalación de estos contaminantes se presentan alteraciones mecánicas en la función pulmonar directamente a nivel del pulmón, cambios químicos y bioquímicos en pulmones y en otros órganos e irritación de mucosas y ojos (Goldstein and Balchum, 1962).

En autopsias se han encontrado edemas y hemorragias en personas expuestas a concentraciones altas de ozono.

Cambios químicos y bioquímicos.- El comportamiento elástico de los pulmones está determinado por una mezcla de tejidos, elementos y sustancias las cuales actúan como surfactantes (sustancia natural, es un agente activo que reviste a los alveolos) o por edemas. Evidencias muestran que estos factores pueden ser grandemente afectados por los cambios químicos registrados en el tejido pulmonar con exposiciones continuas de ozono.

En el tejido pulmonar hay sustancias como el ácido hialurónico, hepamina, kerato sulfatos y proteínas colágenas y elastinas. Teóricamente estos compuestos se pueden desnaturar por la acción del ozono dando como resultados aldehídos.

Se ha observado una reducción en la capacidad vital en personas que hacen ejercicio y están expuestas a concentraciones por arriba de 0.11 ppm de ozono.

En animales de laboratorio expuestos a concentraciones bajas de O<sub>3</sub> han presentado casos de efisema pulmonar y en las necropsias se han detectado lesiones y cicatrices a nivel del pulmón.

Evidencias muestran que el efecto que tiene el ozono sobre las células es el mismo que el generado por la radioactividad.

Algunos estudios en personas expuestas a ozono han indicado el umbral de olor por el cual el ozono puede ser detectado y sobre los cambios en la función pulmonar.

Nueve de cada diez personas sujetas a una concentración de 40 µg / m<sup>3</sup> (0.02ppm) de ozono fueron capaces de detectar el olor inmediatamente y este persistió un promedio de cinco minutos.

Los nitratos de peroxiacetilo y otros compuestos químicos como los aldehídos causan irritación ocular que es característico de la contaminación fotoquímica.

Los estudios realizados en 206 personas por L. Calderón, A. Hernández, H. Bravo y H.López en 1992 en la zona Suroeste de la Cd. de México, encontraron que una exposición prolongada de cerca de 4.7 hr/día a concentraciones superiores a 0.11 ppm de ozono, presentaron una serie de variaciones a nivel de las células y tejidos nasales, algunas de las alteraciones encontradas fueron: atrofia mucosal (7.28% de las personas estudiadas), formación de puentes de moco hialino ( 7.76% de las personas estudiadas), sangrado en epitelio nasal (11.65% de las personas estudiadas), resequedad nasal (63.59% de las personas estudiadas), obstrucción nasal (59.22% de las personas estudiadas), entre otras.

Tabla 5.3.3 Capacidad respiratoria en personas expuestas al O<sub>3</sub>

		Epidemiológico	Toxicológicos
↓	Función pulmonar	XX	XX
↑	Síntomas	XX	
↓	Actividad celular	X	
↓	Defensas	X	XX

Fuente: Curso epidemiología ambiental 1993

## E.- Efectos en la vegetación producidos por el ozono.

Tres grupos de fititóxicos han sido aislados del complejo fotoquímico:

a) Ozono

b) Bióxido de Nitrógeno

c) Peroxinitratos

Nitrato de peroxipropinilo	(PPN)
Nitrato de peroxibutilino	(PBN)
Nitrato de peroxisobutiril	(P <sub>iso</sub> BN)

En toxicidad el PAN es tan tóxico como el PPN en los vegetales y el PBN, P<sub>Piso</sub> BN

El daño a los vegetales es una de las primeras manifestaciones de la contaminación fotoquímica del aire. Debido a este factor de sensibilidad en las plantas, estas han sido utilizadas como indicadores biológicos.

Los síntomas visibles producidos en las plantas pueden ser clasificados como:

- a) *Daño grave*.- Se reconoce como un colapso celular con desarrollos subsecuentes de necrosis.
- b) *Daños crónicos* .- Se identifican por la presencia de necrosis con o sin clorosis u otros patrones pigmentarios.
- c) *Efectos fisiológicos*.- Se encuentran alteraciones en el crecimiento, reducción en la producción y cambios en la calidad de las plantas. Los daños por ozono en las hojas se reconocen por un punteado o manchado en ellas. Estos daños se han registrado en las plantas más sensibles a una exposición de  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.03ppm), la velocidad de daño puede ser en períodos menores si actúa el  $\text{SO}_2$  junto con el ozono.

El PAN produce daños en el envés de la hoja. Se caracteriza por un vidriado o bronceado de la hoja. Este daño se ha observado en una planta sensible a una concentración de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.01 ppm) por un periodo de 5 horas.

Estudios indican que las plantas parecen ser mas sensibles a este gas, cuando crecen en suelos de baja fertilidad.

Sin embargo está demostrado que el ozono es el fitotóxico más importante del complejo fotoquímico y esto se debe a que se presenta en concentraciones más altas.

## **F.- Efectos en la atmósfera producidos por el ozono**

La mezcla de ozono, hidrocarburos reactivos y óxidos de nitrógeno generan la contaminación atmosférica fotoquímica, conocida como "smog fotoquímico".

Hay una disminución de la visibilidad; esta se genera por la producción de partículas secundarias, aerosoles fotoquímicos acompañados por el mismo proceso de turbulencia atmosférica y transporte que efectúan otros contaminantes.

## 5.4 ÓXIDOS DE NITRÓGENO

Los óxidos de nitrógeno más importantes en la atmósfera son el óxido de nitrógeno (NO) y el bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), estos forman parte de los óxidos de nitrógeno (NOx).



### A.- Características y fuentes de origen de los óxidos de nitrógeno:

De las emisiones de óxidos de nitrógeno generadas, gran parte de ellas son emitidas en forma de NO, el cual posteriormente es oxidado en la atmósfera para formar NO<sub>2</sub> que es más tóxico e irritante. El NO<sub>2</sub> es el compuesto que más interés causa, en cuanto efectos a la salud se refiere.

*Fuentes naturales.*- Los óxidos de nitrógeno (NOx) son los compuestos que se encuentran en mayor concentración en la atmósfera y son el resultado de procesos biológicos, siendo el más abundante el óxido de nitrógeno (NO) producido por la acción bacteriana. (Por este tipo de fuente tenemos cerca de  $50 \times 10^7 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$  de NOx).

*Fuentes antropogénicas.*- Estos contaminantes se generan en áreas urbanas en concentraciones de 10 a 100 veces mayor que en áreas no urbanas.

Tecnológicamente las emisiones de NOx están relacionadas con el uso de materiales combustibles. En 1976 en los Estados Unidos el uso de gas natural y el carbón como fuentes energéticas y los vehículos de combustión interna generaron las siguientes cantidades de NOx: (National Air Quality and emission, 1977)

23 x 10 <sup>6</sup> toneladas de NOx	[	11.8 x 10 <sup>6</sup> de ton por fuentes estacionarias de combustión
		10.1 x 10 <sup>6</sup> de ton por transporte
		0.6 x 10 <sup>6</sup> de ton. por procesos industriales
		0.1 x 10 <sup>6</sup> de ton por disposición de residuos sólidos
		0.3 x 10 <sup>6</sup> de ton. por la industria.

### B.- Propiedades físicas de los óxidos de nitrógeno

**Oxido de nitrógeno** .- Es un gas incoloro, inodoro y ligeramente soluble en agua.

Tabla 5.4.1. Propiedades físicas del NO

Peso Molecular	30.01	UMA
Punto de Ebullición	-150.80	°C



**Bióxido de Nitrógeno.**- Es un gas de color café rojizo de un olor picante característico.

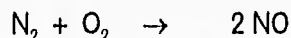
Tabla 5.4.2. Propiedades físicas del NO,

Peso Molecular	46.01	UMA
Punto de Ebullición	-21.2	°C

### C.- Propiedades químicas de los óxidos de nitrógeno.

#### Óxido de nitrógeno

Es un producto primario formado en los procesos de combustión a altas temperaturas, cuando el oxígeno atmosférico (O<sub>2</sub>) reacciona endotérmicamente con el nitrógeno (N<sub>2</sub>) como lo muestra la siguiente reacción:



Esta reacción continúa hasta un nivel de equilibrio, dependiendo de las siguientes variables: concentración de los gases, temperatura y presión.

#### Bióxido de Nitrógeno

El NO<sub>2</sub> es un gas que no causa daños directo a los materiales; sin embargo este gas puede reaccionar con la humedad presente en la atmósfera dando como resultado un gas corrosivo y altamente oxidante, puede ser fisiológicamente irritante y tóxico. El NO<sub>2</sub> reacciona con agua para producir ácido nítrico y otros ácidos nitrosos u óxido de nitrógeno, como lo muestran las siguientes reacciones:



ó

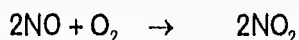


El NO<sub>2</sub> es un producto de la reacción termomolecular del óxido de nitrógeno con el oxígeno atmosférico.



Puesto que dos moléculas de NO están involucradas en la formación del NO<sub>2</sub>, la velocidad de formación está relacionada con el cuadrado de la concentración de NO; si duplicamos la concentración de NO la velocidad de reacción se incrementa cuatro veces.

Es posible explicar la formación del NO<sub>2</sub> por un mecanismo alternativo como resultado de la reacción del O<sub>2</sub> con una molécula débil de NO.



Todavía hoy en día no ha sido posible demostrar cual de todas estas reacciones describe correctamente el proceso de formación del NO<sub>2</sub> en la atmósfera.

## Ciclo de formación del NO<sub>2</sub> en la atmósfera

Por la acción de la radiación solar el NO puede ser cuantitativamente convertido a NO<sub>2</sub>. Ver figura 5.4.1.

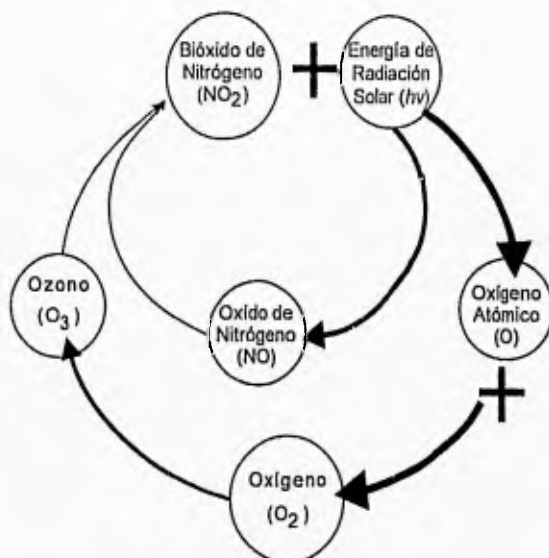


Figura. 5.4.1 Ciclo de formación del NO<sub>2</sub> en la atmósfera

Fuente: Bravo, Sosa y Torres, 1988

## D.- Efectos a la salud producidos por los óxidos de Nitrógeno.

*Efectos a la salud.*- El NO no es irritante y no se considera que produzca efectos en la salud, sin embargo el NO<sub>2</sub> es altamente tóxico e irritante su efecto primario es a nivel pulmonar está potencialmente relacionado con la fibrosis pulmonar crónica, se ha observado aumento en bronquitis crónica en niños de 2 a 3 años de edad expuestos a concentraciones por debajo de 0.01 ppm (Air Quality Criteria for Nitrogen Oxides, 1971), se incrementa la susceptibilidad a infecciones respiratorias o agrava afecciones preexistentes y a concentraciones de 100 ppm (188 µg/m<sup>3</sup>) es mortal para la mayoría de las especies animales y el 90% de las muertes son causadas por edemas pulmonares. Ver tabla 5.4.3 (Air Quality Criteria for Nitrogen Oxides, 1971)

Al ser un irritante daña la conjuntiva ocular y en personas fumadoras o que están expuestas a concentraciones de 98 a 135 µg/m<sup>3</sup> pueden presentar la formación de metahemoglobina.

Tabla 5.4.3. Efectos a la salud producidos por los NO<sub>2</sub>

Efectos	ppm	µg/m <sup>3</sup>	Tiempo de exposición
Incremento de incidencias en enfermedades respiratorias en familias	0.062	117	2 a 3 años
	0.109	205	
Incremento de incidencias en bronquitis aguda en infantes y escolares.	0.063	118	2 a 3 años
	0.083	156	
Detección y malestar en el olfato.	0.12	225	percepción inmediata
En conejos se presentaron cambios en el colágeno pulmonar	0.25	940	35 días continuos 4 h/día x

## E.- Efectos en la vegetación producidos por los óxidos de nitrógeno:

Las respuestas de las plantas a estos contaminantes se han clasificado en tres categorías:

- a) Daños agudos
- b) Daños crónicos
- c) Efectos fisiológicos

*Daños agudos.*- Se manifiestan por un colapso celular, con un subsecuente desarrollo de patrones necróticos. Los síntomas aparecen como el resultado de exposiciones cortas a diferentes niveles de concentración de  $\text{NO}_2$  y estos se presentan pasadas las primeras dos horas hasta las 48 horas después de haber estado expuestos.

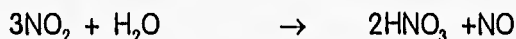
*Daños crónicos.*- Son causados por largas exposiciones intermitentes y a bajas concentraciones de  $\text{NO}_x$ . Como resultado tenemos clorosis en tejido foliar que puede estar acompañado por la caída de las hojas.

*Efectos fisiológicos.*- Presentan alteraciones en el crecimiento, se reduce la producción, hay cambios en la calidad de los productos.

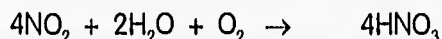
En el laboratorio los efectos fisiológicos encontrados son:

- ✓ Disminución en la fotosíntesis
- ✓ Cambios en la transpiración y procesos enzimáticos.

La disminución en la actividad fotosintética se determina por la cantidad de  $\text{CO}_2$  absorbido por la planta: los mecanismos bioquímicos que se presentan provocados por los óxidos de nitrógeno causan un daño directo en la planta. Cuando el  $\text{NO}_2$  reacciona con agua, forma una mezcla estequiométrica de óxido de nitrógeno y ácido nítrico.



ó



Esta reacción probablemente se produce con el gas localizado en las superficies húmedas del parénquima esponjoso en las hojas de las plantas.

Las primeras observaciones de los efectos fitotóxicos en las plantas que se observaron en 1950 en California, EUA. por la acción continua (8 meses) de  $\text{NO}_x$  a una concentración de  $470 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.25 ppm) provocando caída de las hojas en los cítricos. Ver tabla 5.4.4.

## F.- Efectos en la atmósfera producidos por los óxidos de nitrógeno

Uno de los efectos que primeramente se ven a una concentración de 0.25 ppm (Hill, 1970) es la reducción de la visibilidad en una atmósfera contaminada debido a que el  $\text{NO}_x$  absorbe la energía luminosa de espectro de luz visible causando que los objetos lejanos se vean de un

color amarillo pálido o café rojizo, que en conjunto con otros contaminantes como las partículas suspendidas contribuyen a la formación del "smog fotoquímico"

Tabla 3.4.4 Daños Crónicos y efectos fisiológicos en la vegetación producidos por el NO y el NO<sub>2</sub>

Gas	Planta	Exposición			Efectos
		ppm	µg/m <sup>3</sup>	Días	
NO	Graminacea <i>Avena sativa</i> avena	0.6	1.1		Aparente reducción de la actividad fotosintética
	Leguminosae <i>Medicago sativa</i> alfalfa	0.6	1.1		Aparente reducción de la actividad fotosintética
	<i>Phaseolus vulgaris</i> frijol pinto	3.0 a 10.0			Reducción inmediata de un 70% de la fotosíntesis
	Solaneaceae <i>Lycopersicon sp.</i> Tomate	3.0 a 10.03.0			Reducción inmediata de un 70% de la fotosíntesis
NO <sub>2</sub>	Graminacea <i>Avena sativa</i> avena	0.6	1.1		Reducción de la velocidad de la fotosíntesis
	Leguminosae <i>Medicago sativa</i> alfalfa	0.6	1.1		Aparente reducción de la velocidad de la fotosíntesis
	<i>Phaseolus vulgaris</i> frijol pinto	0.6	1.1	10 a 19 días	Decrece en su peso seco, incrementa contenido clorofílico por unidad de peso
	Rutaceae <i>Citrus sinensis</i> Naranja			35 días	Clorosis de hojas, con puntos en la hoja.
				240 días	Se incrementan los puntos en la hoja, se reduce la producción
	Solaneaceae <i>Lycopersicon sp.</i> Tomate			10 a 22 días	Decrece su peso en seco; área de la hoja, incrementa clorofila y se curvan hacia abajo las hojas

## 5.5 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El Monóxido de carbono es el contaminante más abundante en la atmósfera, por lo que es esencial la comprensión de sus propiedades así como sus efectos.

### A.- Características y fuentes de origen del monóxido de carbono

*Fuentes Naturales.*- El monóxido de carbono en 1948 fue descubierto por primera vez en la atmósfera por Migeotte 1949 quien concluyó que una cantidad apreciable de este gas estaba presente en la atmósfera terrestre.

Su oxidación ocurre en la atmósfera, pero su velocidad de reacción es muy lenta. Su tiempo de residencia en la atmósfera varía de 0.07 a 1.38 años (25 a 450 días aprox.)

*Fuentes Antropogénicas.*- El monóxido de carbono (CO) se genera como producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles. Entre las variables que afectan las emisiones de las combustiones son:

- la concentración de oxígeno
- la temperatura de la flama
- el tiempo de residencia del gas
- las turbulencias en las cámaras de combustión

Las emisiones de CO por los vehículos de combustión interna en las zonas urbanas es cerca del 85% del total del CO emitido a la atmósfera en dichas áreas, estas emisiones podrían ser reducidas con la implementación de eficientes sistemas de combustión como: el uso de convertidores catalíticos en la salida de los gases de escapes de vehículos para oxidar el CO a CO<sub>2</sub>.

### B.- Propiedades físicas del monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es un compuesto incoloro, inodoro, insípido y poco soluble en agua; es una molécula diatómica que se encuentra en la atmósfera en forma de gas.

Esta molécula no absorbe la radiación ultravioleta del espectro electromagnético.

La tabla 5.5.1 que a continuación se presenta nos muestra las propiedades físicas del CO:

Tabla 5.5.1. Propiedades físicas del Monóxido de Carbono

Peso Molecular	28.01	UMA
Punto crítico	-140.00	°C
Punto de ebullición	-191.50	°C
Densidad a 0°C y 1 atm	1.25	g/l
Densidad a 25°C y 1 atm	1.145	g/l
Solubilidad en agua a 1 atm y a 0°C	44.3	ppmm *
Solubilidad en agua a 1 atm y a 20°C	29.0	ppmm *
Solubilidad en agua a 1 atm y a 25°C	26.8	ppmm *

\* - Partes de millón por masa

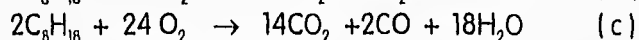
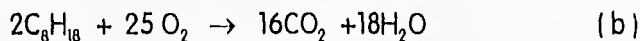
### C.- Propiedades químicas del monóxido de carbono

El monóxido de carbono es uno de los componentes inorgánicos más importantes del carbono, producidos por la combustión de combustibles.



El enlace triple del monóxido de carbono C=O es la unión más fuerte químicamente conocida.

En la combustión de gasolina (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) en la que el oxígeno está en las proporciones necesarias deberíamos de obtener solamente bióxido de carbono y agua. (Ecuaciones b y c), por lo que el O<sub>2</sub> es el reactivo limitante (Air Quality Criteria for Carbon Monoxide 1989).



### D.- Efectos a la salud producidos por el monóxido de carbono

El CO existe en los mamíferos primordialmente por la inhalación del aire ambiental y por el catabolismo normal de los anillos pirrólicos. Fuentes endógenas de CO resulta en los niveles de COHb de aproximadamente de 0.5 %, cualquier incremento de COHb se debe a fuentes exógenas. (Air Criteria for Carbon Monoxide, 1989)

Cuando se inhala el monóxido de carbono que entra a la corriente sanguínea se une a la hemoglobina constituyendo la carboxihemoglobina (CoHb). La afinidad del monóxido de carbono por la hemoglobina en los glóbulos rojos es de 200 a 2500 veces la del oxígeno (O<sub>2</sub>). Esto reduce la cantidad de oxígeno entregado a todos los tejidos del cuerpo. El nivel de daño producido por el CO en la hemoglobina está determinado por la concentración de gas inhalado y el tiempo de exposición a este gas, pero también inhibe la difusión del O<sub>2</sub> restante. El humo del cigarro también contiene monóxido de carbono por lo tanto los fumadores tendrán una parte de su hemoglobina inactivada independientemente de la que se inactive por la contaminación atmosférica externa.

El monóxido de carbono debilita las contracciones del corazón, reduciendo la cantidad de sangre bombeada por este, por lo tanto también se reduce la cantidad de oxígeno que abastece a músculos y órganos.

Individuos con anemias, enfisemas y otras enfermedades pulmonares, así como los fumadores o aquellos que vivan en grandes altitudes son más susceptibles a los efectos del CO.

Aún en concentraciones relativamente bajas el CO puede tener efectos sobre la función mental, agudeza visual y reflejos. Tabla 5.5.2.

## E.- Efectos en la vegetación producidos por el monóxido de carbono.

Las plantas son relativamente insensibles al monóxido de carbono a concentraciones que demuestran ser tóxicas para los animales.

En concentraciones muy altas el CO puede inducir a la formación de raíces adventicias en plantas superiores, así como estimular su crecimiento.

Plantas expuestas a concentraciones de 11 450 mg/m<sup>3</sup> (10 000 ppm) de CO presentan anomalías en su crecimiento, incluyendo epinastia e hiponastia en las hojas, retarda la elongación del tallo, tiene hojas pequeñas y deformes y de prematura abscisión.

Se ha observado que los microorganismos tienen un amplio rango de respuestas al CO, incluyendo la oxidación autotrófica, así que cualquier cambio en las concentraciones de la atmósfera puede traer consigo alteraciones en la distribución poblacional de microorganismos del suelo, generando que la microflora del suelo pueda estar considerada en un sistema de equilibrio.

Tabla 5.5.2 Efectos en la salud producidos por los diferentes niveles de carboxihemoglobina (CoHb) en la sangre

CoHb	Efectos
0.4 %	Valores fisiológicos normales para no fumadores.
2.5 - 3 %	Decrementa en el rendimiento de ejercicio en pacientes con angina de pecho o con claudicación intermitente.
4 - 5 %	Cefáleas, lasitud en palicías de tránsito, incrementa el déficit de oxígeno en no fumadores.
5 - 10 %	Cambias en el metabolismo miocárdial y posible daño; disminución estadísticamente significativa de la percepción visual, de la agilidad mental o de la habilidad de aprendizaje.
+10 %	Cefáleas y problemas de coordinación manual y cambias en respuesta visual medida por electroencefalograma.

## 6.- ÍNDICE METROPOLITANO DE CALIDAD DEL AIRE (IMECA)

El índice Metropolitano de Calidad del Aire o IMECA fue elaborado por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) en 1986 como una herramienta de información accesible al público sobre la variación de la calidad del aire respirable y su efecto a la salud.

Su realización se basó principalmente en una revisión bibliográfica de todos los índices de calidad del aire elaborados a partir de 1966.

El IMECA se define como un índice de calidad del aire que transforma las concentraciones de los diversos contaminantes atmosféricos de las normas de calidad del aire o episodios para cualquier localidad en datos que sean fácilmente comprendidos por el público en general.

Para poder elaborar el IMECA se buscó que este índice cumpliera con las siguientes características:

- a) Fácilmente comprensible para el público en general.
- b) Ser consistente en los niveles de contaminación percibidos por la población en general.
- c) Tener un significado espacial claro.
- d) Utilizar el mayor número de contaminantes atmosféricos y poder incluir futuros contaminantes.
- e) De un modo fácil de cálculo utilizando suposiciones razonables.
- f) Tener una base científica.
- g) Relacionar la calidad del aire actual con metas y normas de calidad del aire.
- h) Relacionar la calidad del aire con las decisiones para casos de episodios de contaminación.
- i) Mostrar las variaciones diarias de los niveles de contaminantes.
- j) Poder estimar con la suficiente confiabilidad plazos cortos (max. de 24 horas).
- k) Dar a la población información clara y confiable de los niveles de contaminación atmosférica, así como los riesgos que esto implica en la salud.
- l) Proporcionar a los que toman decisiones de las herramientas necesarias de ponderación para poder comparar las estrategias de control.
- m) Contar con sistemas sencillos de evaluación y predicción de las condiciones de contaminación de un área para la activación de planes en casos de emergencias.



n) Evitar que el índice caiga en los errores de ambigüedad y eclipsación de valores\*.

Estructuralmente el IMECA se basa en dos algoritmos de cálculo fundamental, uno de ellos involucra en forma similar al sistema UNIPEX y el otro involucra el sistema PSI que evita los problemas de ambigüedad y eclipsamiento. El primer algoritmo se caracteriza por la presencia de dos puntos de quiebre, que se obtuvieron a partir de las normas mexicanas de calidad del aire y en los niveles de contaminación para los cuales existe evidencia de daño significativo a la salud.

Al primer punto se le asigna el valor de 100 que corresponde a la Norma Mexicana de Calidad del Aire fijados por el: "Acuerdo que establece los lineamientos para determinar el criterio base para la evaluación de la calidad del aire" publicado en el Diario Oficial del 29 de noviembre de 1987. Los valores se muestran en la tabla 6.1, estos valores se obtuvieron en el año 1982 por la ya desaparecida Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. El último punto corresponde al valor de 500 y corresponde a las normas y criterios establecidos por la EPA y aplicados en el PSI. Ver tabla 6.2.

Tabla 6.1 Criterios base para la evaluación del 100 de la calidad del Aire

Contaminante	Concentración	Tiempo de muestreo
Partículas totales en suspensión	275.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 hr..
Dióxido de Azufre	0.13 ppm	24 hr.
Monóxido de Carbono	13.00 ppm	8 hr. / móvil
Dióxido de Nitrógeno	0.21 ppm	1 hr.
Ozono	0.11 ppm	1 hr. / día.

Tabla 6.2. Valores de concentración de contaminantes que representan daño significativo para la salud (500).

Contaminante	Concentración	Tiempo de muestreo
Partículas totales en suspensión	1000.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 hr.
Dióxido de Azufre	1.0 ppm	24 hr.
Monóxido de Carbono	50.0 ppm	8 hr.
Dióxido de Nitrógeno	2.0 ppm	1 hr.
Ozono	0.6 ppm	1 hr.
Sinergismo Partículas x $\text{SO}_2$	187.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{ppm}$	24 hr.

Fuente: Índice Metropolitano de la Calidad del Aire: 1986

Todos los contaminantes a excepción del producto sinérgico de PST x  $\text{SO}_2$  presentan un intervalo total de variación que va de 0 a 500 y el valor del contaminante sinérgico PST x  $\text{SO}_2$  va de 200 a 500 presentando cuatro puntos de quiebre.

Entre el valor de 100 a 500 existen tres puntos adicionales, los cuales clasifican el intervalo de variación de los subíndices en diferentes términos descriptivos de la calidad del

\* Se entiende por eclipsamiento, el error que se comete cuando el modo de integración de los diversos subíndices conduce a una subevaluación de la contaminación existente.  
Se entiende por ambigüedad, el error que se comete cuando el modo de integración de los diversos subíndices conduce a una sobrevaluación de la situación existente en contaminación

aire (ver tabla 6.3), estos términos son el 200, 300 y 400. Lo mismo se hizo con el segmento 0 - 100. Se obtiene un punto intermedio el 50 creando así dos intervalos 0 - 50 y el 51 - 100.

Tabla 6.3 Coeficientes para calcular el IMECA

K	b <sub>k</sub>	PST		SO <sub>2</sub>		CO		NO <sub>2</sub>		O <sub>3</sub>		PST x SO <sub>2</sub>	
		µg/m <sup>3</sup>		ppm		ppm		ppm		ppm		µg/m <sup>3</sup> x ppm	
		24 horas		24 horas		8 horas		1 hora		1 hora		24 horas	
a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	ab <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>
1	0	0	0.3636364	0	769.230769	0	7.692307	0	476.190476	0	909.090909	-	-
2	50	137.5	0.3636364	0.064	769.230769	6.5	7.692307	0.105	476.190476	0.055	909.090909	-	-
3	100	275.0	0.5517241	0.130	459.770114	13.0	10.810810	0.210	223.463687	0.110	816.326530	-	-
4	200	456.0	0.5517241	0.350	459.770114	22.0	10.810810	0.660	223.463687	0.230	816.326530	24.5	1.332
5	300	637.0	0.5517241	0.560	459.770114	31.0	10.810810	0.100	223.463687	0.350	816.326530	9.6	1.332
6	400	818.0	0.5517241	0.780	459.770114	41.0	10.810810	1.550	223.463687	0.480	816.326530	150.1	2.702
7	500	1000.0	0.5517241	1.00	459.770114	50.0	10.810810	2.00	223.463687	0.60	816.326530	181.1	2.702

El IMECA comprende seis contaminantes que son: Partículas suspendidas totales (PST), Ozono (O<sub>3</sub>), Monóxido de Carbono (CO), Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el sinergismo entre el PST y el SO<sub>2</sub>

En la estructuración del índice a cada indicador le corresponde un subíndice  $I_k$ , donde  $I = 1...6$  contaminantes y se determina con la siguiente ecuación.

$$I_k = \{ c_k - a_k \} + b_{jk}, \quad k=1...7$$

donde :  $a$  y  $b$  representan las coordenadas del punto de quiebre  
 $m$  es la pendiente del segmento de la línea y se calcula:

$$m = (b_{jk} + 1 - b_{jk}) / (a_{jk} + 1 - a_{jk})$$

$k$  y  $c$  representan la concentración promedio del indicador correspondiente.

Por medio de esta ecuación se calcula las coordenadas que relacionan la concentración del contaminante con el valor IMECA, reportando así sus valores como lo muestra la tabla 6.4, datos calculados a una atmósfera de presión y a una temperatura de 25°C.

El segundo algoritmo del IMECA se obtiene al combinar los seis subíndices de cada indicador para obtener un índice global basándose en el sistema PSI empleando la función del operador máximo que consiste en escoger el subíndice de valor más alto de un denominado contaminante crítico reportándose junto con el valor del índice.

$$IMECA = \text{Max} < I_{PST}, I_{SO_2}, I_{O_3}, I_{CO}, I_{NO_2}, I_{PST \times SO_2} >$$

aire (ver tabla 6.3), estos términos son el 200, 300 y 400. Lo mismo se hizo con el segmento 0 - 100. Se obtiene un punto intermedio el 50 creando así dos intervalos 0 - 50 y el 51 - 100.

Tabla 6.3 Coeficientes para calcular el IMECA

K	b <sub>k</sub>	PST		SO <sub>2</sub>		CO		NO <sub>2</sub>		O <sub>3</sub>		PST x SO <sub>2</sub>	
		Mg/m <sup>3</sup>		ppm		ppm		ppm		ppm		Mg/m <sup>3</sup> x ppm	
		24 horas		24 horas		8 horas		1 hora		1 hora		24 horas	
a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>	a <sub>k</sub>	1/m <sub>k</sub>
1	0	0	0.3636364	0	769.230769	0	7.692307	0	476.190476	0	909.090909	-	-
2	50	137.5	0.3636364	0.064	769.230769	6.5	7.692307	0.105	476.190476	0.055	909.090909	-	-
3	100	275.0	0.5517241	0.130	459.770114	13.0	10.810810	0.210	223.463687	0.110	816.326530	-	-
4	200	456.0	0.5517241	0.350	459.770114	22.0	10.810810	0.660	223.463687	0.230	816.326530	24.5	1.332
5	300	637.0	0.5517241	0.560	459.770114	31.0	10.810810	0.100	223.463687	0.350	816.326530	9.6	1.332
6	400	818.0	0.5517241	0.780	459.770114	41.0	10.810810	1.550	223.463687	0.480	816.326530	150.1	2.702
7	500	1000.0	0.5517241	1.00	459.770114	50.0	10.810810	2.00	223.463687	0.60	816.326530	181.1	2.702

El IMECA comprende seis contaminantes que son: Partículas suspendidas totales (PST), Ozono (O<sub>3</sub>), Monóxido de Carbono (CO), Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el sinergismo entre el PST y el SO<sub>2</sub>

En la estructuración del índice a cada indicador le corresponde un subíndice I<sub>i</sub>, donde i = 1...6 contaminantes y se determina con la siguiente ecuación.

$$I_i = \{ c_i - a_{ik} \} + b_{ik}, \quad k=1...7$$

donde: a y b representan las coordenadas del punto de quiebre  
m es la pendiente del segmento de la línea y se calcula:

$$m = (b_{ik} + 1 - b_{jk}) / (a_{ik} + 1 - a_{jk})$$

k y c representan la concentración promedio del indicador correspondiente.

Por medio de esta ecuación se calcula las coordenadas que relacionan la concentración del contaminante con el valor IMECA, reportando así sus valores como lo muestra la tabla 6.4, datos calculados a una atmósfera de presión y a una temperatura de 25°C.

El segundo algoritmo del IMECA se obtiene al combinar los seis subíndices de cada indicador para obtener un índice global basándose en el sistema PSI empleando la función del operador máximo que consiste en escoger el subíndice de valor más alto de un denominador contaminante crítico reportándose junto con el valor del índice.

$$IMECA = \text{Max} \langle I_{PST}, I_{SO_2}, I_{O_3}, I_{CO}, I_{NO_2}, I_{PST \times SO_2} \rangle$$

De acuerdo a las concentraciones obtenidas por el índice IMECA se ha elaborado un plan de acción que detenga el incremento de la concentración en el aire, este programa de acciones está en la tabla 6.4.

Tabla 6.4 Determinación de los puntos de quiebre de IMECA.

Contaminante	Punto 0	Punto 100		Punto 500
PST	0	275.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		1000.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SO <sub>2</sub>	0	0.13 ppm		1.0 ppm
CO	0	13.00 ppm		50.0 ppm
NO <sub>2</sub>	0	0.21 ppm		2.0 ppm
O <sub>3</sub>	0	0.11 ppm		0.6 ppm
Contaminante	Punto 200	Punto 300	Punto 400	Punto 500
PST x SO <sub>2</sub>	24.5 ppm	99.6 ppm	150 ppm	187.1 ppm

Basándose en la clasificación de Ott - Thom el IMECA es un índice del tipo 6B<sub>2</sub>C.

La manera de reportar al IMECA consiste en dividir a la zona metropolitana en cinco sectores que se mencionan a continuación:

- Noroeste
- Noreste
- Centro
- Suroeste
- Sureste

Dentro de estos cinco sectores se distribuyeron en 1986, 25 estaciones de monitoreo de la red automática (RAMA) y 14 estaciones de monitoreo manual. La RAMA fué proyectada en tres etapas; ampliación, reforzamiento y consolidación. La integración se inició con las 25 estaciones conectadas teleméricamente a un centro de operaciones, tal y como se muestra en la figura 6.1. En la última modificación efectuada en 1992 al IMECA las 5 zonas se definieron con una correspondencia definida, utilizando las principales avenidas, tal y como se muestra en la figura 6.2

Se da valor del índice IMECA del sector haciendo pasar primeramente los datos obtenidos por un control de calidad, para evitar errores y corregirlos por la calibración, eliminando de esta manera los valores que no sean válidos; posteriormente se calcula independientemente para cada estación de monitoreo los promedios de contaminación de un período de 24 horas para partículas y bióxido de azufre, promedios móviles de 8 horas para el monóxido de carbono y promedios horarios de ozono y bióxido de nitrógeno; seleccionando se obtiene el promedio máximo del día u horario. Posteriormente se obtiene el promedio aritmético de las concentraciones por sector, el cual es transformado en el subíndice correspondiente de acuerdo a la función lineal segmentada de cada contaminante

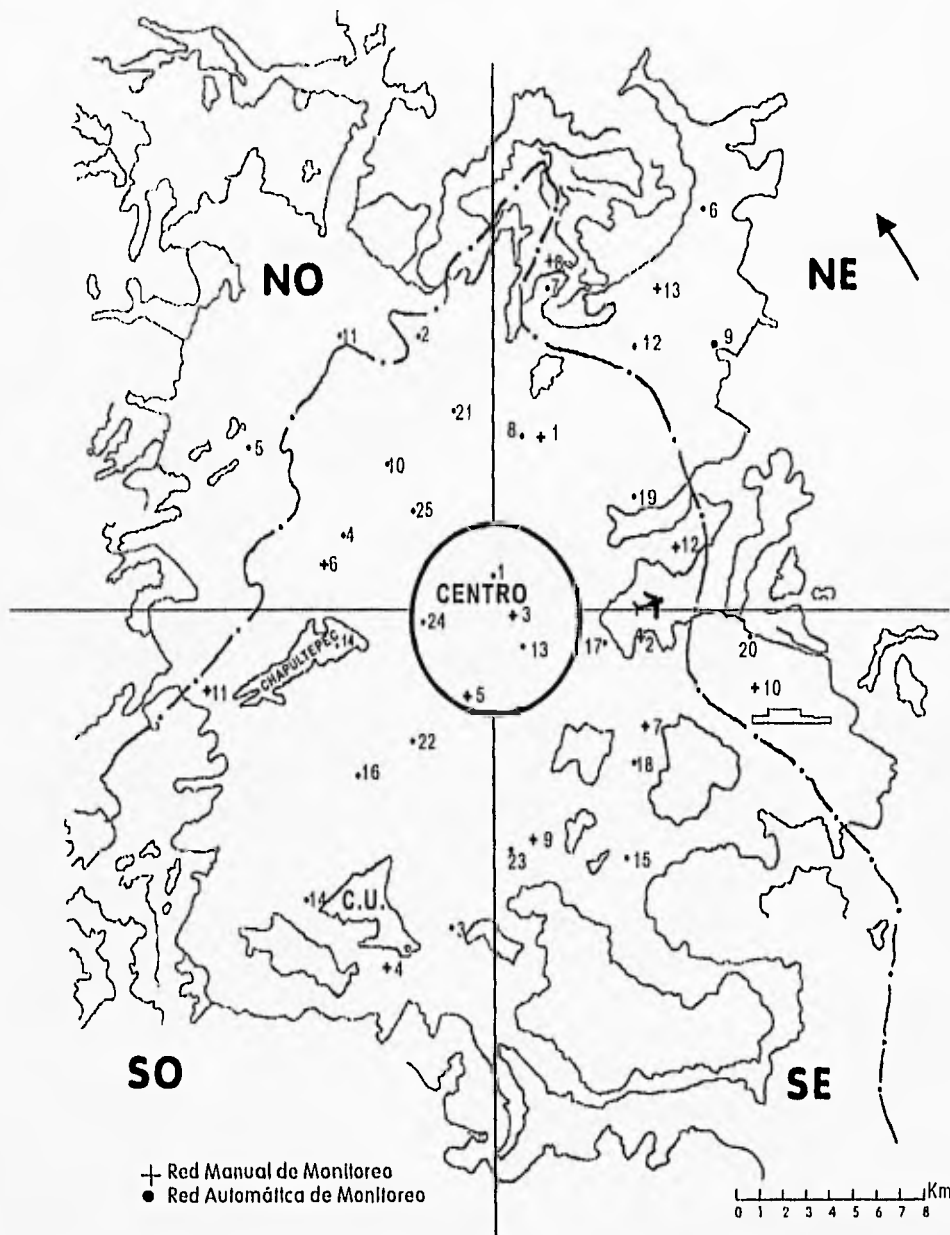


Fig. 6.1 Localización de las estaciones Manuales y Automáticas de la Red de Monitoreo

seleccionando como Índice Metropolitano de Calidad del Aire IMECA el valor máximo de los subíndices calculados. A partir de julio de 1992 sólo se reporta el valor máximo obtenido.

El periodo de cálculo del IMECA era de las 13:00 horas de un día hasta las 12:00 horas del día siguiente, desde 1992 es continuo.

Como se mencionó anteriormente la zona metropolitana inició con 25 estaciones de monitoreo automático distribuidas en los cinco sectores (figura 6.1), aunque existen dos estaciones la 20 y la 24 que son consideradas en dos sectores al mismo tiempo, entonces tenemos que en el sector:

Noroeste	consta de las estaciones:	2, 4, 5, 10, 11, 21 y 25
Noreste	consta de las estaciones:	6, 7, 8, 9, 12, 19 y 20
Centro	consta de las estaciones:	1, 13, 17, 22 y 24
Suroeste	consta de las estaciones:	3, 14, 16 y 24
Sureste	consta de las estaciones:	15, 18, 20 y 23

No todas las estaciones de monitoreo registran a todos los contaminantes como se observa a continuación:

- |   |   |
|---|---|
| a) Estación Noroeste<br>( 7 estaciones) | 5 estaciones que determinan SO <sub>2</sub><br>3 estaciones que determinan CO<br>2 estaciones que determinan PST, O <sub>3</sub><br>1 estación que determina NOx, hidrocarburos y ácido sulfhídrico |
| b) Estación Noreste<br>( 6 estaciones)  | 6 estaciones que determinan PST<br>3 estaciones que determinan CO<br>4 estaciones que determinan SO <sub>2</sub><br>1 estación que determina hidrocarburos y ácido sulfhídrico                      |
| c) Estación Centro<br>( 5 estaciones)   | 4 estaciones miden CO<br>2 estaciones miden PST, SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> e hidrocarburos.<br>1 estación que mide NOx y ácido sulfhídrico.  |
| d) Estación Suroeste<br>(4 estaciones)  | 3 estaciones miden CO<br>2 estaciones miden PST, SO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub><br>1 estación mide NOx.   |
| e) Estación Sureste                     | 4 estaciones miden CO<br>3 estaciones miden PST<br>2 estaciones miden O <sub>3</sub><br>1 estación mide NOx   |

Para la determinación de las concentraciones atmosféricas se utilizan hoy en día los equipos de monitoreo automáticos semejantes a los empleados en los Estados Unidos de Norteamérica y Alemania. Los equipos utilizados para cada contaminante se mencionan a continuación:

- |   |  |
|---|--|
| a) Partículas totales en suspensión<br>PM <sub>10</sub> | ⇒ Dispersión lumínica.<br>⇒ Gravimétrico (1994)*         |
| b) Dióxido de Azufre                                    | ⇒ Fluorescencia ultravioleta pulsante                    |
| c) Monóxido de Carbono                                  | ⇒ Absorción infrarroja con filtro gaseoso de correlación |
| d) Ozono  | ⇒ Fotometría ultravioleta                                |
| e) Óxidos de Nitrógeno                                  | ⇒ Quiluminiscencia en fase gaseosa                       |
| f) Hidrocarburos  | ⇒ Fotoionización ultravioleta                            |
- (Para la descripción de estos equipos de monitoreo consultar el apéndice A)

\* PM<sub>10</sub> significa la fracción respirable cuyas partículas son menores a 10 μm. Estas partículas se empiezan a monitorear y reportar a partir de 1994



Figura. 6.2 Nueva correspondencia entre las líneas divisorias de las 5 zonas (Fuente SEDUE)

Fuente: Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental del Valle de México (1994)

La representación e interpretación del IMECA consta de tres secciones figura 6.3

- 1.- Presenta un mapa de la región, delimitando los cinco sectores ( NO, NE, C, SO y SE).
- 2.- Una tabla de reportes en la que establece el período de tiempo reportado, los valores de IMECA para cada una de las zonas y el contaminante más significativo.
- 3.- Recomendaciones respecto a los diferentes rangos de IMECA.

COMISIÓN METROPOLITANA PARA LA  
PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA  
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL DEL  
VALLE DE MÉXICO

**IMECA**

INDICE METROPOLITANO DE LA CALIDAD  
DEL AIRE CON LOS DATOS REGISTRADOS  
DURANTE LA ÚLTIMA HORA

## REPORTE IMECA HORARIO

FECHA: DÍA / MES / AÑO

HORA DEL REPORTE: 13:00

CONT \ IMECA	DESCRIPCIÓN
	<b>NOROESTE (NO)</b>
O <sub>3</sub>	76 DENTRO DE LA NORMA
NO <sub>2</sub>	8 DENTRO DE LA NORMA
SO <sub>2</sub>	12 DENTRO DE LA NORMA
CO	19 DENTRO DE LA NORMA
PM10	47 DENTRO DE LA NORMA
	<b>NORESTE (NE)</b>
O <sub>3</sub>	56 DENTRO DE LA NORMA
NO <sub>2</sub>	8 DENTRO DE LA NORMA
SO <sub>2</sub>	123 NO SATISFACTORIO
CO	19 DENTRO DE LA NORMA
PM10	47 DENTRO DE LA NORMA
	<b>CENTRO (CE)</b>
O <sub>3</sub>	76 DENTRO DE LA NORMA
NO <sub>2</sub>	8 DENTRO DE LA NORMA
SO <sub>2</sub>	12 DENTRO DE LA NORMA
CO	19 DENTRO DE LA NORMA
PM10	47 DENTRO DE LA NORMA
	<b>SUROESTE (SO)</b>
O <sub>3</sub>	107 NO SATISFACTORIA
NO <sub>2</sub>	9 DENTRO DE LA NORMA
SO <sub>2</sub>	11 DENTRO DE LA NORMA
CO	21 DENTRO DE LA NORMA
PM10	40 DENTRO DE LA NORMA
	<b>SURESTE (SE)</b>
O <sub>3</sub>	173 NO SATISFACTORIO
NO <sub>2</sub>	18 DENTRO DE LA NORMA
SO <sub>2</sub>	11 DENTRO DE LA NORMA
CO	35 DENTRO DE LA NORMA
PM10	40 DENTRO DE LA NORMA

OBSERVACIONES:

ENTREGADO POR: MIGUEL A. GALLARDO

NOMENCLATURAS :

0-100 IMECAS CONDICIÓN DENTRO DE NORMA  
101-200 IMECAS CONDICIÓN NO SATISFACTORIO  
201-300 IMECAS CONDICIÓN MALA  
301-500 IMECAS CONDICIÓN MUY MALA

O<sub>3</sub> - MÁXIMO VALOR DE UN PERIODO DE UNA HORA  
NO<sub>2</sub> - MÁXIMO VALOR DE UN PERIODO DE UNA HORA  
SO<sub>2</sub> - MÁXIMO VALOR DE UN PERIODO DE 24 HORAS  
CO - MÁXIMO VALOR DE 8 HORAS  
PM10 - MÁXIMO VALOR DE UN PERIODO DE 24 HORAS

Figura. 6.3 Ejemplo de un Reporte IMECA por hora

Fuente: Comisión Metropolitana para la prevención y control de la contaminación Ambiental del Valle de México



Tabla 6.5 Acciones del Programa de Contingencia del IMECA

IMECA	NIVEL	ACCIONES A TOMAR POR NIVEL EN CONDICIONES DESFAVORABLES DE DISPERSIÓN
401 - 500	3	Implantar el tercer nivel de reducción de emisiones en fuentes industriales (más del 70 %).
301 - 400	2	Implantar el segundo nivel de reducción de emisiones en fuentes industriales (promedio 50 %). Incrementar el suministro de gas natural a las termoeléctricas.
201 - 300	1	Implantar el primer nivel de reducción de emisiones en fuentes industriales (promedio 30%). PEMEX suministrará mayor cantidad de gas natural a C.F.E. para la generación de energía eléctrica.
100 - 200	Alerta interna	Vigilancia horaria las 24 horas del día de los niveles de contaminación y actualización y análisis de las condiciones meteorológicas prevaletientes. Elaboración del pronóstico de calidad del aire y preparación de recursos materiales y humanos.
Gestión ambiental permanente		21 medidas contra la contaminación del aire: Incremento del transporte colectivo no contaminante, reforestación, mejoramiento de la disposición final de residuos sólidos, relocalización industrial, suministro de combustibles menos contaminantes entre otras. Convenios de concertación con cámaras industriales para el mejoramiento de los procesos de combustión e instalación de equipo anticontaminante. Acciones de la población para el control de emisión de contaminantes. Monitoreo continuo de la calidad del aire

En 1991 se acordó proceder con la segunda y tercera etapa de la RAMA que eran la de ampliación y reforzamiento debido a el crecimiento poblacional de la ZMCM y a la necesidad de un mejor conocimiento de las características de la calidad del aire a través de una mayor cobertura territorial. Ver fig 6.4

Para lograrlo se instalaron siete estaciones adicionales, ahora se cuenta con 32 estaciones de monitoreo distribuidas de la siguiente manera:

- a) Zona Noroeste: 7 estaciones que determinan SO<sub>2</sub>  
(9 estaciones) 9 estaciones que determinan CO  
4 estaciones que determinan O<sub>3</sub>  
6 estaciones que determinan NOx  
2 estaciones que determinan PM10
- b) Zona Noreste 7 estaciones que determinan SO<sub>2</sub> y CO  
(9 estaciones) 2 estaciones que determinan O<sub>3</sub>  
3 estaciones que determinan NOx y PM10
- c) Zona Centro 4 estaciones que determinan SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NOx,  
(5 estaciones) 5 estaciones que determinan CO  
1 estación que determina PM10



## MODIFICACIONES AL ÍNDICE METROPOLITANO DE LA CALIDAD DEL AIRE.

La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología en noviembre de 1989 publica la nueva presentación al IMECA, en donde la SEDUE reconoce la necesidad de efectuar ajustes en el cálculo, presentación y divulgación del índice.

Las modificaciones fueron:

**a) Zonificación.** - El área Metropolitana se mantiene en cinco zonas, sólo que los límites para cada zona toma de referencia algunas avenidas conocidas por la ciudadanía. Figura 6.3

**b) Hora de Corte.**- El período de cálculo del IMECA se efectúa de las 18:00 horas del primer día hasta las 18:00 horas del segundo, es decir cada 24 horas.

**c) Promedios móviles sobre 8 horas del CO.**- Se modifica el algoritmo de cálculo del IMECA, para que los promedios móviles de CO estén de acuerdo a la hora de corte. En cuanto a los equipos utilizados se han modernizado, y se ha cambiado en algunos contaminantes el tipo de equipo.

**a) Para partículas totales en suspensión** - Antiguamente se utilizaba el gravimétrico hoy en día se utilizan dos métodos diferentes:

- Atenuación de Radiación que solamente mide  $PM_{10}$ .

- Gravimetría de elemento oscilante.- este aparato mide PTS,  $PM_{10}$ ,  $PM_{7.5}$  y  $PM_{4.0}$

**b) Para hidrocarburos.**- Se modificó y ahora se utiliza el DOAS (Espectroscopía Diferencial Óptica de Absorción.)

En enero de 1992 se crea la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México.\*

La Comisión se integró con representantes gubernamentales (incluido el gobierno del Edo. de México) y sociedad en general con el fin de poder intercambiar ideas y opiniones sobre el tema, para entonces poder tomar decisiones políticas y acciones a seguir. Siendo el Departamento del Distrito Federal el encargado de dar el soporte técnico y administrativo a la Comisión Metropolitana. Figura 6.4.

La Comisión Metropolitana cuenta con un Secretariado Técnico (Dependencias Gubernamentales) y un Consejo Asesor integrado por: Asamblea de Representantes del Distrito Federal, Cámara de Diputados y Senadores, Diputados del Congreso del Edo de México, Grupos Ecologistas, Cámaras de la Industria y el Comercio, Transportistas, Universidades y Científicos. El Secretariado Técnico realiza la integración y gestión de los programas de control los cuales son presentados al Consejo Asesor para su discusión y aprobación.

\* La Contaminación Atmosférica en el Valle de México. Acciones para su control 1988 - 1994

**Comisión  
Metropolitana para la  
Prevención y Control  
de la Contaminación  
Ambiental en el Valle  
de México**

- ⇒ DDF
- ⇒ Gobierno del Edo. de México
- ⇒ SHCP
- ⇒ SSA
- ⇒ Comisión Nal. del Agua
- ⇒ SEGOB
- ⇒ SECOGEF
- ⇒ IMP
- ⇒ CFE
- ⇒ PEMEX
- ⇒ SCT
- ⇒ SECOFI
- ⇒ SEP
- ⇒ SEDESOL

Figura 6.5 Instituciones que concurren con sus facultades y recursos en la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación

## 7.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN CON BASE EN LA REVISIÓN DEL IMECA

El índice IMECA usado por la Comisión Metropolitana es un índice que debe servir para informar verazmente los cambios en la calidad del aire respirable permitiendo la toma de medidas adecuadas en caso de que uno o más contaminantes rebasen los niveles permitidos de calidad de aire para los cuales existe una evidencia de daño significativo a la salud.

A continuación se presenta la revisión efectuada al Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA ) tal y como fue diseñado por la SEDUE en 1986. En donde se señalan algunos puntos de vista que presentan contradicciones o confusiones a lo que se supone un índice de calidad del aire debe de ser.

### **INTRODUCCIÓN**

Por presentar el índice predecesor "IMEXCA"\* grandes problemas de credibilidad y falta de ética se redactó el IMECA que se acerca al PSI, pero cae en el error de no tomar en consideración la relación salud - concentración de contaminantes de otros países y usa de su punto 100 a 500 el concepto ya mencionado del índice UNIPLEX.

### **ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE**

#### 1.1. Consideraciones generales

El índice de calidad del aire es una función de transformación, es el resultado de aplicar dicha transformación a los datos de concentraciones de contaminantes, si esta transformación se maneja inadecuadamente, el índice pierde en gran parte su valor de herramienta informativa al público

---

\* El IMEXCA fue elaborado por la empresa particular TECNOCONSULT, partiendo de las disposiciones oficiales

Como todo índice el IMECA toma los criterios propuestos por Thom y Ott<sup>[2]</sup>, que sirven de base para la elaboración de cualquier índice de calidad del aire, sin embargo es importante destacar los siguientes puntos: "... En general un Índice de Calidad del Aire debe tener las siguientes propiedades:..." 4.- Incluir los principales contaminantes atmosféricos y permitir la futura inclusión de otros. 5.- Poder calcular fácilmente utilizando suposiciones (hipótesis) razonables. 6.- Tener una base científica. 7.- Relacionar la calidad actual del aire con metas y normas de calidad del aire ..." En relación a los puntos mencionados en este párrafo, donde se mencionan se destacan los puntos 4, 5, 6 y 7 de las propiedades de un índice, se debe dejar claro que:

- para poder incluir nuevos contaminantes deben de existir criterios y normas de calidad del aire para esos nuevos contaminantes.
- el utilizar una forma sencilla de cálculo para el índice, implica emplear un algoritmo en una ecuación matemática o usar una gráfica. En ambos casos el resultado debe de ser el mismo.
- si lleva una base científica, asume que existe una relación entre efectos y concentración del contaminante.
- los índices de calidad del aire son herramientas informativas para el público en general, el índice no establece metas, sino el de indicar los diferentes niveles de contaminación con sus respectivos efectos a la salud.

## 1.2 Evolución Histórica.

En 1977 se elabora en México el Índice Mexicano de Calidad del Aire (IMEXCA) el cual fue diseñado de acuerdo a la metodología del UNIPEX, este último se aplica en aquellos países que carecen de estudios sobre la contaminación atmosférica. La compañía responsable de la elaboración es la denominada TECNOCONSULT, quien menciona en uno de sus párrafos dedicados a las Conclusiones y Recomendaciones el que se debe de encubrir la verdad acerca de la calidad ambiental encontrada y relacionada con la salud para no alertar a la ciudadanía.

Nueve años después se crea el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA) dicho índice argumenta estar basado en el PSI de los E.U.A., pero más bien es una mala copia del mismo, ya que en su estructura el IMECA es muy semejante al IMEXCA, inclusive en sus recomendaciones y conclusiones, (por ejemplo: menciona que no es conveniente publicar los datos particulares con ubicación geográfica precisa, porque obligaría al gobierno, a tomar medidas de control drásticas a nivel local y que esto causaría confusión y desarticulación de los programas); además de no presentar fundamentos científicos para cada criterio empleado. Es conveniente mencionar esto, para evitar en un futuro acciones que repercutan directamente en la salud de los habitantes de la Ciudad de México. Por eso, los valores que se obtienen de un índice deben ser siempre relacionados con normas de calidad del aire y con planes de activación de emergencias, principalmente con los efectos negativos a la

salud. Aunque no se tenga en algunas circunstancias un control del 100% en la aplicación y seguimiento de estos planes de emergencia.

Es por lo cual se aplica lo mencionado en el IMECA que " el uso de funciones lineales segmentadas, en las cuales, la relación entre subíndice y efectos se plantea en forma lineal para diversos intervalos, modificando en cada uno, la pendiente y la ordenada al origen." Esto no lo cumple el IMECA, porque a partir del valor de 100 las pendientes en los siguientes intervalos son constantes, funcionando más bien como una función lineal simple, que tiene como defecto que no es representativa para los diversos contaminantes.

" El modelo de integración del Índice, en base a los diversos subíndices calculados debe evitar el eclipsamiento o la ambigüedad." La manera en que se calcula el IMECA cae precisamente en los errores de eclipsamiento y ambigüedad, al ser comparado con el PSI de quien dice basarse tal y como lo muestra la figura 7.1

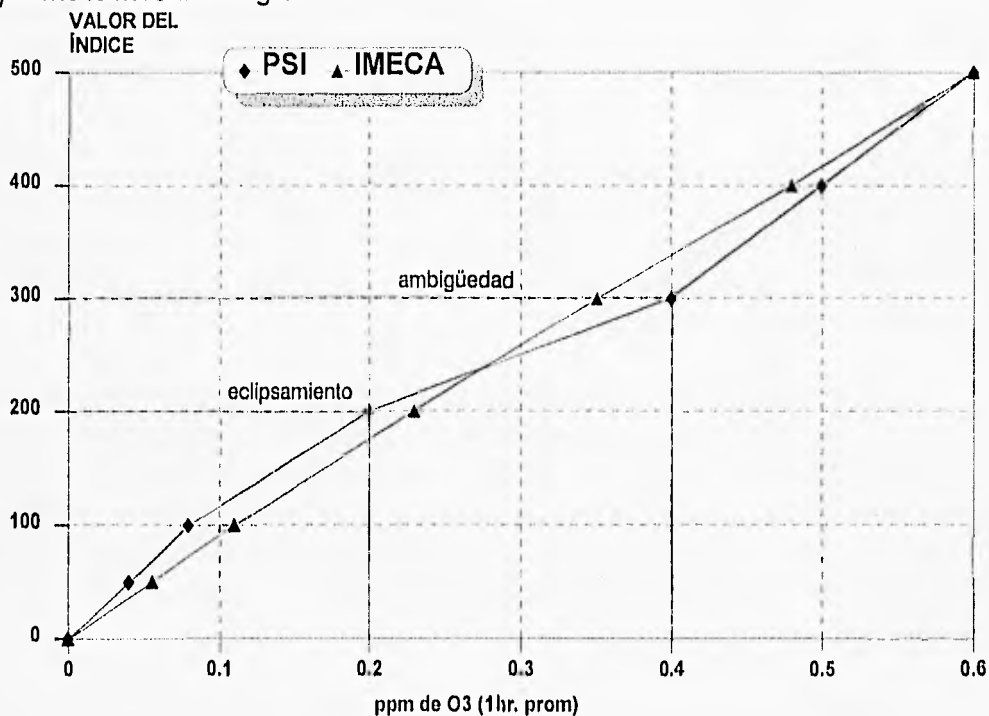


Figura. 7.1 Gráfica comparativa entre los índices IMECA y PSI para el O<sub>3</sub>, donde se aprecian los conceptos de eclipsamiento y ambigüedad.

Hablar de eclipsamiento tal y como se aprecia en la figura 7.1 para el punto 200, es el error que se comete y nos conduce a una subevaluación de la situación existente de contaminación. En el caso de la ambigüedad tal y como se aprecia en la figura para los puntos 300 y 400 donde es el otro índice el que se encuentra por debajo en la concentración del contaminante que se está comparando, esto significa que hay una sobrevaluación de la

situación prevalescente. En ambos casos no se representa el estado real de la calidad del aire que respiramos.

## **2.- ESTRUCTURA Y METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE IMECA**

Se nos dice que la elaboración de este índice fue: "*... la combinación de dichos subíndices un Índice global.*

*El primero involucra, (refiriéndose al IMECA) en forma similar al sistema UNIPEX, la utilización de funciones linealmente segmentadas basados en dos puntos de quiebre principales, los cuales se obtuvieron a partir de las normas mexicanas de la calidad del aire ... Además de los dos "puntos de quiebre" mencionados las funciones cuentan con tres puntos adicionales, los cuales tienen por objeto permitir clasificar el intervalo de variación de los subíndices en diferentes términos descriptivos de la calidad del aire.*

*Para ello, el segmento entre 0 y 100 se dividió en dos partes iguales: 0 - 50 y 50 - 100, y el intervalo entre 100 y 500 en cuatro segmentos iguales: ... como es el sistema UNIPEX."* se dice que el IMECA es un índice que se basó para su elaboración en dos índices de calidad del aire el UNIPEX, y el Pollutant Standard Index. (PSI).

El IMECA se autoclasifica como una función segmentada que se basa sólo en dos puntos de quiebre por lo que en esta parte su base es el UNIPEX. Estos puntos de quiebre que utiliza el IMECA, deberían de ser seis de acuerdo a la estructura del PSI en el cual dice basarse. La clasificación del IMECA que le corresponde es 5B<sub>2</sub>C y no 6B<sub>2</sub>C como dice ser. (ver Introducción. Clasificación de los índices).

Se menciona que los puntos de quiebre se obtuvieron a partir de las normas mexicanas de calidad del aire; México carece de un verdadero estudio de los efectos generados por la contaminación, de igual manera no toma en cuenta problemas como la altitud en la determinación de dichas normas, los valores empleados parecen ser obtenidos de diferentes normas de calidad del aire utilizados en diversas partes del mundo. Dicha norma mexicana de calidad del aire se utilizó para definir el nivel 100 y se tomó los valores dados por el PSI para definir el nivel 500.

Exceptuando los valor que da al nivel de 100, toda la estructura del IMECA está basada en el sistema UNIPEX, por lo que el mismo se contradice, ya que afirma tener su propia norma de calidad del aire basada en estudios realizados en México.

Se debe hacer notar que los segmentos 0-50, 50-100 y los intervalos entre 100 y 200, 200-300, 300-400 y 400-500 tienen la misma pendiente, como en el sistema UNIPEX., pero UNIPEX sólo menciona dos segmentos, el de 0-100 y el de 100-500.



El IMECA toma para el producto sinérgico PST-SO<sub>2</sub> cuatro puntos de quiebre diferentes, tal y como el PSI lo propone, de esta manera debió de haber considerado a los otros contaminantes atmosféricos, si se propone ser congruente con el PSI.

Se menciona que "... el IMECA utiliza los siguientes seis indicadores de la calidad del aire: Partículas suspendidas totales (PST), bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), Ozono (O<sub>3</sub>), monóxido de Carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), y el sinérgismo de los dos primeros (SO<sub>2</sub> x PST).

... Por supuesto, las concentraciones expresadas en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  están referidas a condiciones de presión y temperatura de 1 atmósfera y 25 °C, lo cual implica que los subíndices correspondientes a PST y a SO<sub>2</sub> x PST se corrigen a dichas condiciones de presión y temperatura". De estos seis indicadores que utiliza el IMECA de los cinco primeros obtenemos sus concentraciones por medio de mediciones, el sexto indicador se obtiene al multiplicar las concentraciones obtenidas para las partículas y para el bióxido de azufre, por lo que el IMECA es un índice que debe clasificarse como 5B<sub>2</sub>C. De la manera en que se incluyó este producto sinérgico tomando en cuenta la información existente en la literatura para los conceptos de criterios de episodios y nivel de daño significativo, pero se debió seguir este método para los otros contaminantes

Si el IMECA toma esto en consideración debe entonces ser más exigente en la determinación de los niveles y no solamente aplicar este concepto al producto sinérgico entre el bióxido de azufre y partículas sino a todos los contaminantes en general.

### **3. SISTEMAS Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE**

#### **3.1. Antecedentes**

En 1977 se "... Adquirió la primera Red Automática de Monitoreo Atmosférico de procedencia holandesa con 20 estaciones fijas y 2 móviles; de las estaciones fijas 5 contaban con monitores de partículas, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y O<sub>3</sub>, así como con equipo meteorológico para la determinación de la dirección y velocidad de viento, la humedad relativa y la temperatura; en las 15 estaciones restantes únicamente se contaba con monitores de SO<sub>2</sub> y CO; las estaciones móviles estaban equipadas con instrumental meteorológico y monitores de polvo, SO<sub>2</sub> y CO; de estas 20 estaciones únicamente se instalaron 16, sin haberse integrado por problemas técnicos los monitores de NO<sub>x</sub>". Toda la información de esta red, que era obtenida en forma continua, se procesaba en un minicomputador, mismo que debía generar los informes horarios y diarios.

El equipo comprado por la entonces Subsecretaría del Mejoramiento del Medio Ambiente cuando se adquirió era tecnología obsoleta. Además no recolectó datos continuos, ya que al no poderles dar mantenimiento a los instrumentos, estos fallaron y realmente no nos indicó la gravedad del problema en esos momentos por no tener información adecuada y confiable.

#### 4.- CRITERIOS DE CALIDAD DEL AIRE

No nos deberíamos referir a **CRITERIOS** cuando realmente estamos hablando de **NORMAS**, esto creó una confusión entre lo que se conoce como parte de una legislación (**NORMAS**) y los efectos en la salud que un contaminante genera (**CRITERIOS**) " Los valores de concentración de contaminantes seleccionados para el valor 100 del IMECA que corresponden a los valores fijados por el " Acuerdo que establece los lineamientos para determinar el criterio base para la evaluación de la calidad del aire " del C. Secretario de Salubridad y Asistencia, publicado en el diario oficial del 29 de noviembre de 1982." Se debe considerar que estos valores deben de ser determinados en base a criterios científicos, los cuales pueden ser modificados según aumenten nuestras bases científicas y no en declaraciones o acuerdos políticos.

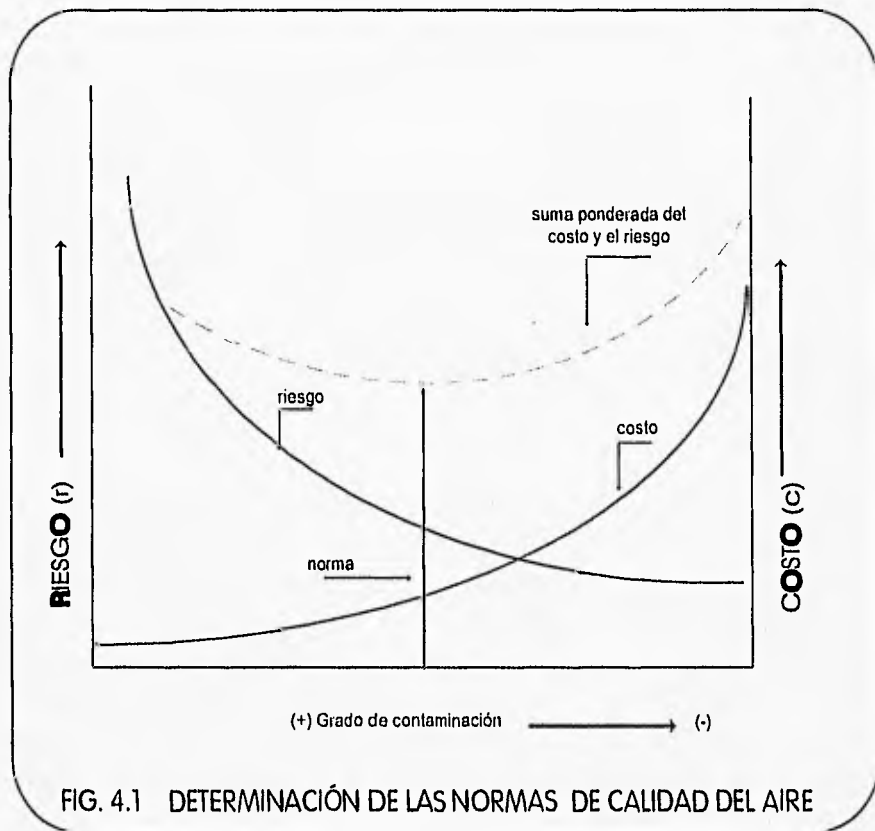


FIG. 4.1 DETERMINACIÓN DE LAS NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE

Figura 7.2 Relación entre el riesgo a la salud, el grado de contaminación y el costo de control de emisión.

FUENTE: Comisión Metropolitana de la Calidad del Aire

En la figura 7.2 denominada "Determinación de las normas de calidad del aire" intenta explicar a través de una relación entre riesgo (costo que me generan a nivel salud), y costo

(equipo de control) y grado de contaminación el origen de las normas de calidad del aire, cuando realmente lo que me proporciona es como tener un mejor control en las NORMAS de EMISIÓN de contaminantes. La explicación dada para esto, por parte de quienes elaboraron el índice dicen que:

*"Este procedimiento de selección es congruente con los criterios aplicados en otros países; así, en publicación de la Organización Mundial de la Salud OMS " Manual on Urban Air Quality Management", donde se señalan, como criterios básicos a utilizarse en el establecimiento de normas de calidad del aire, el análisis de las funciones de riesgo y de costo de control de cada contaminante, aplicando una suma ponderada de las mismas para obtener un punto óptimo que corresponde al mínimo de la función suma.; (Figura 4.1) los factores de ponderación dependerán de los criterios políticos y opinión pública prevaleciente en el país, debiendo considerarse la situación real del aire en la zona de interés a fin de evitar la adopción de propuestas poco realistas".* Como se observa en la gráfica, las normas de calidad del aire están basadas en los efectos de la contaminación sobre el hombre y el ambiente que lo rodea, para la elaboración de dichas Normas, deberán considerar los criterios de calidad de aire y así poder determinar hasta que punto el nivel de contaminación deberá de ser reducido para proteger a la población en general, esto genera el establecimiento de ciertas normas de calidad del aire que a su vez genera las normas de emisión para cada contaminante en particular, por lo que el costo de control de cada contaminante no tiene nada que ver con la determinación de valor del IMECA.

Para obtener propuestas realistas hay que tener conciencia de la situación de cada área en particular, independientemente de los criterios políticos y opinión pública prevaleciente en ese momento.

En la gráfica 7.2 la curva que corresponde a costos, dice que a mayor nivel de contaminación los costos operativos de control son bajos, es decir el disminuir el 20% en un mayor nivel de contaminación no es tan caro como el disminuir 20% cuando la contaminación es menor (se necesita utilizar equipo de control más sofisticado) eso implica que conforme se va invirtiendo en equipo de control de contaminantes los riesgos van a ir disminuyendo, hasta llegar al punto óptimo que es la intersección de las dos curvas, a partir de ese momento cada pequeño avance para la reducción en el riesgo lleva un gran costo económico. Por lo que las normas de emisión deben de fijarse hacia los puntos óptimos o acercarse lo más posible a este, siempre y cuando la norma de emisión fijada tome como meta final las normas de calidad del aire, para lograr esto se necesita de tiempo y apoyo financiero.

La tabla 7.1 del índice llamada "Factores considerados en el establecimiento de las normas de calidad del aire para México" toman 6 elementos tal y como se muestra a continuación.

Tabla 7.1 Factores considerados en el establecimiento de las normas de calidad del aire para México.

FACTOR	PESO (%)
Efectos detectados en la salud	26.665
Calidad del aire en México	21.325
Normas de otros países	20.955
Factibilidad técnico económica de reducción de emisiones	15.635
Efectos detectados en la vegetación	8.225
Efectos detectados en la visibilidad	8.195

Cada uno de los factores que se observan en la tabla tiene un valor porcentual al que se asume que el "peso" es la importancia que le dan a cada uno de ellos, para así poder explicar las Normas de Calidad del Aire que funcionan en el IMECA.

Si analizamos cada uno de los factores, ignorando en como llegaron a la obtención de sus valores en "peso de importancia" se observa que el punto que corresponde a la influencia de las normas de otros países en la elaboración de nuestra propia Norma Mexicana, deberíamos ser más congruentes en la adopción de nuestros valores, para ello debemos de basarnos en los estudios epidemiológicos efectuados bajo las condiciones que vive la ZMCM, ya que las normas dadas por la EPA para el PSI o cualquier otro organismo fueron el resultado de años de investigación y basándose en sus criterios de calidad del aire, en sus propias condiciones ambientales; ver figura 7.3.

En cuanto al punto que se refiere a la "Factibilidad técnico económica de reducción de emisiones" no tiene nada que ver dentro de lo que se considera una Norma de Calidad del Aire, ya que esta, como se ha mencionado anteriormente está relacionada con los efectos a la salud generados por los contaminantes y es totalmente independiente de los aspectos técnicos y económicos, si se carece de estos dos, no quita el valor de la norma de calidad que es una meta a alcanzar para el bienestar de la población, que si se tienen los medios, puede ser que la meta se alcance a corto plazo y en caso de carecer de ellos su tiempo a alcanzarse será a largo plazo, pero la meta existe y seguirá estando relacionada a el bienestar y la salud de la población en general.

#### 4.1. Efectos de la Altura

En la presentación del índice se toca el efecto de la altitud, como una variable a ser tomada en cuenta y nos dice que *"... si se compara a un sujeto que vive a nivel del mar con un sujeto que vive a una altura mayor de 2,290 metros sobre el nivel del mar, se observa que este último existe una ventilación pulmonar aumentada (hiperventilación), un decremento en gradiente de la*

concentración de oxígeno entre el aire alveolar y la sangre arterial y una policitemia ( mayor número de glóbulos rojos). Al existir la hiperventilación (mayor cantidad de aire respirado por minuto ( $l/min/m^2$ ), mayor será también la cantidad de aire con contaminantes atmosféricos que ingresen al organismo, ...". Toman como un dato importante la altitud, siendo así que se debería de ser más exigente en el establecimiento de las Normas de Calidad del Aire para la Zona Metropolitana del Valle de México.

#### 4.2. La Experiencia de Otros Países

Como se ve en la figura 7.3 en la que se compara el valor de 100 empleado por el IMECA o sea el valor correspondiente a las normas de calidad del aire, con respecto al panorama internacional. Los valores que México adopta para establecer la Norma Mexicana de Calidad del Aire, no presenta un patrón que ayude a determinar como se establece este y si usa sus propios criterios de calidad del aire.

*" En general se puede señalar que, para efectos de un Índice de calidad del aire si se consideran como valor de 100 las normas de calidad y como valor de 500 el nivel de daño significativo, en el caso de Estados Unidos, y México utilizando la metodología UNIPEX ya señalada (2 puntos de quiebre) las diferencias en los valores de Índice resultantes no sería significativo. (Figura 4.5). Como se ve en la figura 7.4 que corresponde a la figura 4.5 de la publicación del IMECA, la comparación que realiza con respecto al punto 100 se puede aceptar, lo que es un error es el de tomar dichas gráficas de los subíndices como si así fueran usadas por los Estados Unidos Ver la figura 7.5.*

#### **5.0 PRESENTACIÓN DEL IMECA**

Se debe dar a conocer el IMECA correspondiente al parámetro que se exceda el 100 del IMECA, sin llevar a cabo promedios con otros valores que estén por abajo del 100 IMECA.

#### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El IMECA es un índice que debe de ser modificado para que se tomen en cuenta los puntos de quiebre adecuados, basados en las concentraciones de contaminantes identificados con estados de alerta, daño significativo y episodios, que estén ligadas a los efectos a la salud y efectos peligrosos de esta manera se podrán tomar las medidas necesarias para evitar los daños crónicos a la salud.

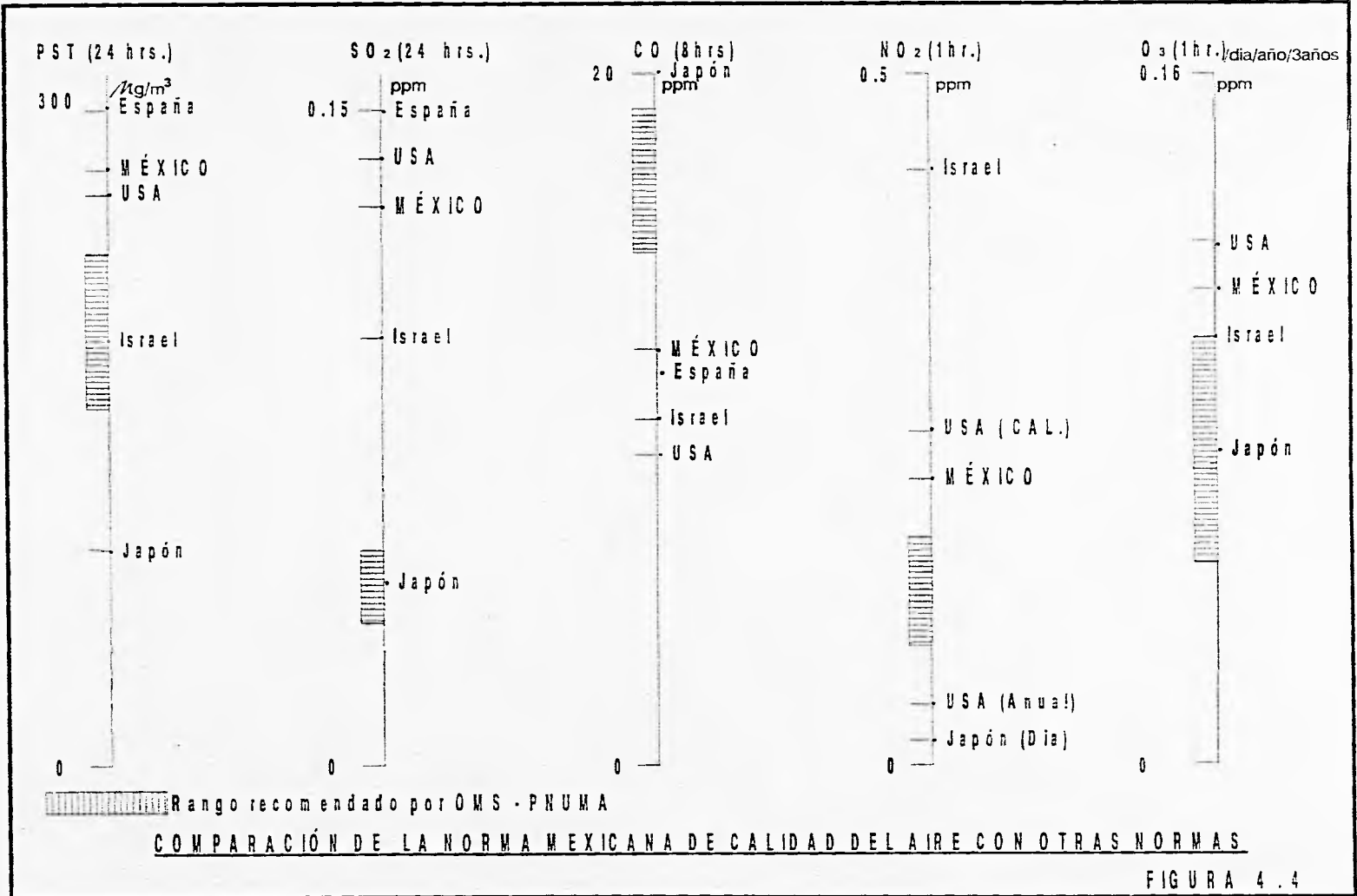


Figura 7.3 Comparación de las Normas Mexicanas de calidad del aire con la utilizada en otros países, para el valor de 100

Fuente: Comisión Metropolitana de la Calidad del Aire



Las mediciones que se efectúan para Plomo son un promedio trimestral y se observó un descenso del Pb ambiental cuando se dejaron de producir los autos de 8 cilindros y posteriormente con el cambio a gasolina con menos plomo estos niveles disminuyeron por lo general por debajo de la norma de calidad de aire; pero esto trajo como consecuencia un incremento elevado en los niveles de ozono.

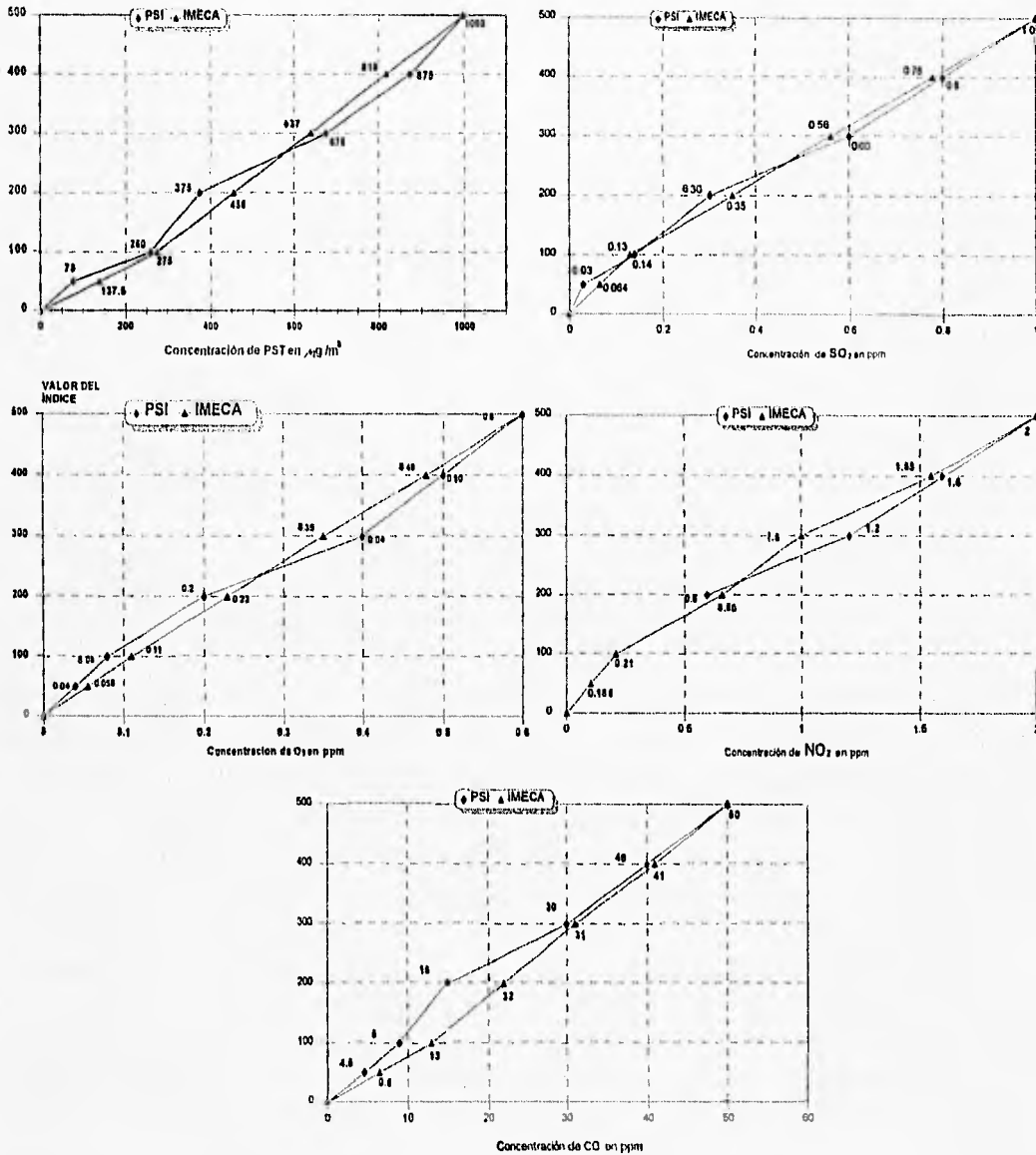


Figura. 7.5 Gráficas comparativas entre el Índice PSI utilizado por los Estados Unidos y el IMECA aplicado en México



" Con el objetivo de evitar la duda en la población respecto a la validez de los datos, al asociar a la población la falta de visibilidad a altos índices de contaminación, puede ser de utilidad que la SEDUE incluya en el reporte del IMECA comentarios respecto a la visibilidad" La visibilidad esta muy relacionada con la concentración de los contaminantes, tal y como se describió en el Marco Teórico de este trabajo por lo que es necesario incluir la visibilidad dentro del índice, ya que es un factor que la población en general observa.



ESTA  
SALUD  
DE LA  
NO  
DEBE  
DEGRADARSE

## 8.- CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

En 1987 se desarrolla en México el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) para la Ciudad de México con la finalidad de informar diariamente al público sobre la calidad del aire.

A finales de la década pasada y lo que llevamos de los 90's se han estado haciendo estudios en diversos centros de investigación sobre los posibles efectos a la salud generados por los contaminantes que están incluidos en el IMECA, sólo que la mayoría de los trabajos han sido enfocados hacia los oxidantes fotoquímicos, básicamente el ozono, por ser el contaminante que continuamente rebasa la norma.

Y aunque se buscan mecanismos para disminuir las concentraciones de este contaminante en la atmósfera, observamos que cada año estamos más horas expuestos a concentraciones mayores de 0.11 ppm de ozono. (fig. 8.1).

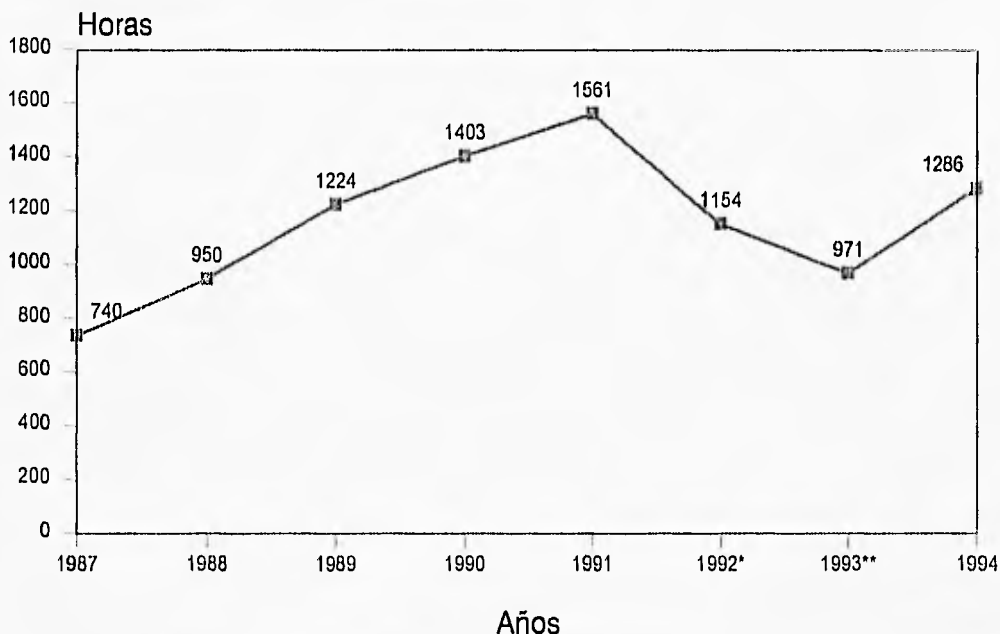


Figura 8.1 Número de horas en que la Concentración de Ozono es mayor de 0.11 ppm registrados en la estación del Centro de Ciencias de la Atmósfera (Zona suroeste de la ZMCM)

Fuente: H.Bravo, Roy Ocaño, P. Sánchez y R. Torres 1991  
\* Datos proporcionados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera  
\*\* No incluye el mes de julio de 1993

Siendo que no hay muchos trabajos efectuados en México que relacionen concentración de contaminante y efectos en los organismos vivos, sería recomendable que el IMECA realmente adoptara los criterios empleados por el Pollutany Standard Index (PSI) de los Estados Unidos, ya que este último se basó en estudios científicos.

Hay que hacer notar que el PSI está calculado para condiciones estándar de presión y temperatura y ninguna ciudad con problemas de contaminación de aire en la Unión Americana se localiza más de 2200 m/nm, en una cuenca, sin una urbanización adecuada y con una población tan contrastante, como se encuentra la Ciudad de México, esto trae como consecuencia:

- el volumen pulmonar y la capacidad de aire respirado son diferentes en personas que viven al nivel del mar con respecto a las que habitan en la ZMCM.
- la radiación solar que recibe la ZMCM es mayor, favoreciendo la generación de contaminantes fotoquímicos;
- al haber menor concentración de oxígeno por m<sup>3</sup> la combustión de los automotores es menos eficiente;
- por la orografía de la cuenca, la dirección predominante de los vientos es de N → S y con una velocidad promedio de 10km/h la cual no favorece la dispersión de los contaminantes;
- crecimiento demográfico, sin control;
- tala extensiva de los bosques que rodean la ZMCM y la desecación casi total de sus sistemas lacustres, lo que trae como consecuencia en la temporada de sequías la formación de tolvaneras;
- una gran cantidad de vehículos automotores e industrias que utilizan combustibles fósiles.

El PSI es un índice que usa una escala de 0 a 500, donde cada uno de sus cinco puntos de quiebre está sustentado por una base científica, siendo en estos puntos donde se correlacionan diariamente las concentraciones de cada contaminante reportados en el índice. Así que un valor menor a 100 destinado para cada uno de los contaminantes, indica que la calidad del aire es buena o moderada, mientras que los valores mayores a 100 significa que uno o más contaminantes ha o han rebasado la norma en uno o más sitios de monitoreo en un área determinada en el día en cuestión y esta, puede estar generando diversos efectos a salud en ciertos sectores de la población.

La tabla 8.1 nos muestra la relación del PSI:

- a) los niveles de concentración
- b) la calidad del aire respirable
- c) descripción de los efectos en la salud
- d) los efectos generales a la salud
- e) las medidas de precaución a seguir.

Cada estimación dada en el PSI está determinada por la acción de los contaminantes en personas susceptibles, recomendando las acciones a seguir los días de alta contaminación.

Basándose en un índice como el PSI y siguiendo los criterios establecidos, El DDF a través de la Comisión Metropolitana tiene como una de sus funciones desarrollar y llevar a cabo el control y mejoramiento de la calidad del aire. Para lograr esto necesita de la información que se obtiene a través del IMECA, misma que debiera ser dada a conocer al público en general .

También es importante recalcar que la RAMA ha modernizado su equipo el cual frecuentemente es evaluado por personal de la EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos y por un organismo Alemán de verificación ambiental TUV Rheinland, siendo los reportes de ambas satisfactorios en cuanto a la calibración y registro de los datos. Hay que tener cuidado en que no sea alterado el algoritmo para la transformación para así entonces poder evitar fallas en la información dada a la población en general.

A pesar de sus deficiencias el IMECA cumple con su cometido que es el de informar la situación ambiental en la que nos encontramos, sólo falta que las autoridades y la población en general sean conscientes de la realidad en la que nos encontramos y que tome una actitud ética y responsable para poder mejorar su calidad de vida. Para poder llevar a cabo esto necesitamos:

- ▶ Una Educación ambiental que desarrolle en los individuos una sensibilización tal que los lleve a reflexionar sobre los problemas ambientales y de esta manera puedan efectuar acciones éticas a través de una concientización con responsabilidad para mejorar o remediar la calidad del aire en este caso. Para poder llegar a esto es necesario que desde la primera etapa de sensibilización exista un proceso cognitivo que explique el por qué y el como se desencadenaron cada uno de los problemas ambientales.
- ▶ Que exista una mayor difusión del IMECA, en donde la información dada sobre la calidad del aire, cree en las personas una preocupación cuando se presenten condiciones que afecten su salud.
- ▶ Se optimice la comunicación entre la RAMA e instituciones como: hospitales y escuelas, para poder tomar las medidas inmediatas en el caso de alguna contingencia ambiental, sin olvidar los medios de comunicación masiva que son los encargados principalmente de informar a la población en general de la situación ambiental.

- ▶ Que la experiencia adquirida en la ZMCM a lo largo de la implementación del IMECA sirva de ejemplo a otras regiones de México que presenten problemas ambientales.
- ▶ En 1991 se creó Comité Técnico Consultivo de la Calidad del Aire\*, como el órgano asesor y de apoyo en el diseño y operación de los sistemas de medición, y el control y abatimiento de la contaminación atmosférica en la ZMCM.

Para que esto funcione se necesita que los integrantes de dicho comité sean profesionales altamente calificados, tanto técnicamente como éticamente. En el caso de la formación profesional técnica, aunque resulte obvio mencionarlo, estos deberán ser del área de la contaminación atmosférica y evaluación del aire.

Inclusive una de las funciones de dicho comité tal y como se menciona en la fracción 4 del Artículo 2º del Acuerdo por el que se crea el Consejo Técnico consultivo de la Calidad del Aire.\*\* sería el de evaluar, analizar el IMECA así como su correcta difusión a la sociedad de la Ciudad de México.

- ▶ La Secretaría de Salud debería ser el órgano encargado de constituir un Sistema Nacional de Información de Efectos a la Salud por Contaminantes, que englobe las investigaciones, realizadas por los diversos centros de investigación como la UNAM, UAM, Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias, Instituto Nacional de Nutrición, entre otros, sobre los efectos en la salud generados por los contaminantes.
- ▶ El mejorar la calidad del aire de la ZMCM es un esfuerzo de conjunto, es importante reconocer quienes son nuestros verdaderos problemas, un ejemplo de ello es: el transporte, donde siempre se culpa a los vehículos particulares como la fuente de emisiones más importantes y se olvidan de los vehículos oficiales o de transporte público que aunque son menos en proporción de número de vehículos, recorren más km que los particulares, además de que estos no se encuentran debidamente verificados o en muchos de ellos su convertidor catalítico no funciona adecuadamente; otro ejemplo a tomar en cuenta son las marchas o manifestaciones.

---

\* Diario Oficial de la Federación 6 de junio de 1991

\*\* Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente 1994

Tabla 9.1 Efectos a la Salud Asociados con el Índice de Contaminantes Estandarizados (Pollutant Standards Index PSI)

Valor del índice	Nivel de calidad del aire	PST	SO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	Descripción de daño a la salud	Efectos generales en la Salud	Medidas de precaución
		24 hr /Mg/m <sup>3</sup>	24 hr /Mg/m <sup>3</sup>	8 hr mg/m <sup>3</sup>	1 hr /Mg/m <sup>3</sup>	1 hr /Mg/m <sup>3</sup>			
500	Daño significativo	1000	2620	57.5	1200	3750	Muy peligroso	Muerte Prematura de enfermos y ancianos. Personas sanas presentan diferentes síntomas que afectan su actividad humana.	Todas las personas deben permanecer resguardadas, cuidando que puertas y ventanas estén cerradas. Deben de minimizar todo esfuerzo físico y evitar el tráfico.
400	Emergencia	875	2100	46.0	1000	3000	Peligrosos	Inicio prematuro de ciertas enfermedades junto con un incremento significativo de síntomas y una disminución en la tolerancia al ejercicio en personas sanas.	Ancianos y personas enfermas deben permanecer protegidas y suprimir esfuerzos físicos. La población en general debe de evitar actividad externa.
300	Cuidado	625	1600	34.0	800	2260	Perjudicial	Aumento significativo de síntomas y disminuye la tolerancia en personas enfermas del corazón y vías respiratorias. Aparición de síntomas en población sana.	Ancianos y personas con problemas cardiacos y respiratorios deben permanecer encerrados reduciendo su actividad física.
200	Alerta	375	800	17.0	400	1130	Desfavorable	Leve manifestación de síntomas en personas susceptibles, con síntomas de irritación en la población sana	Personas con padecimientos respiratorios y cardiacos deben reducir todo esfuerzo físico y su actividad externa.
100	NAAQS	260	365	10.0	160	°	Moderado	° No hay valores del índice reportados por debajo de aquellos especificados por el criterio del nivel de "Alerta". b Norma Primaria Anual (NAAQS Standards Nacionales de la Calidad del Aire Ambiente)	
50	50 % de NAAQS	75 <sup>b</sup>	80 <sup>b</sup>	5.0	80	°	Buena		
0		0	0	0	0	°	Muy Buena		

Fuente: Environmental Protection Agency 1985





# APÉNDICE A

## Determinación de las partículas suspendidas totales PST

Para la determinación de las partículas suspendidas totales en la atmósfera se utiliza el método de referencia de grandes volúmenes (Hi-Vol) durante un periodo de 24 horas de muestreo.

El muestreador de grandes volúmenes utiliza un motor de aspersión de alto flujo (1.3 a 1.7 m<sup>3</sup>/min), el cual succiona la corriente de aire ambiente y está sidpuesto de tal forma para que las partículas menores de 100 µm de diámetro sean dirigidas y pasadas a través de un filtro de fibra de vidrio que retiene partículas de hasta 0.1 µm de diámetro.

El filtro es previamente condicionado a temperatura y humedad relativa (23 ± 2°C y 50 ± 5% respectivamente), pesado y usado para la colección de partículas. Posteriormente es condicionado nuevamente a la temperatura y humedad relativa mencionadas. Basándose en la Norma Mexicana NOM-035-ECOL-1993.

La concentración de las partículas suspendidas totales (µg/m<sup>3</sup>) se calcula determinando el peso gravimétrico de la masa colectada y el volumen del aire muestreado.

## Determinación de las partículas menores a 10 micras PM<sub>10</sub>

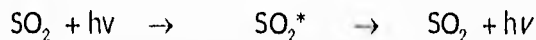
El término PM<sub>10</sub> representa las partículas cuyo diámetro es menor o igual a 10 micras\*, este se determina mediante un muestreador de altos volúmenes con una toma de entrada que permite seleccionar las partículas por su tamaño.

## Determinación del Bióxido de Azufre SO<sub>2</sub>

La detección de este contaminante se basa en emisiones fluorescentes de las moléculas de SO<sub>2</sub> al ser activadas por un haz pulsante de luz ultravioleta. La emisión resultante se transforma a una señal eléctrica proporcional a la concentración de SO<sub>2</sub> presente en la muestra. Siguiendo las especificaciones de la Norma Mexicana NOM-038-ECOL-1993.

---

\* En los EUA se adoptó dicho término como indicador del material particulado en sus Normas Nacionales de Calidad del Aire. La Norma primaria es de 150 µg/m<sup>3</sup>/24hrs. y la anual de 50 µg/m<sup>3</sup>. La norma secundaria es igual a la norma primaria



donde  $h =$  a la constante de Planck  
 $\nu =$  a la frecuencia, Hertz

### Determinación del monóxido de carbono CO

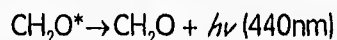
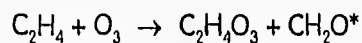
En esta técnica de correlación de gas fijado como se le llama se emite un haz de luz infrarroja que se pasa en forma alternada a través de una celda de filtro de CO, para generar un haz de referencia que ya que no puede ser absorbido por el CO de muestra. Ambos haces de infrarrojo en forma secuencial pasan a través de una celda óptica de pasos múltiples para posteriormente incidir en un filtro de banda angosta que elimina interferencias y entonces son medidos por un detector de infrarrojos, la concentración de CO es proporcional a la diferencia entre las dos mediciones de los dos haces. Tomando como base la Norma Mexicana NOM-034-ECOL-1993.

### Determinación del Ozono.

Se basa en una reacción de químicoluminiscencia entre el ozono y el etileno.

El aire muestreado es introducido simultáneamente con etileno a una cámara de mezclado donde el ozono presente en el aire reacciona con el etileno en una reacción de químicoluminiscencia con la formación de un complejo excitado que emite luz, la cual será detectada por medio de un tubo fotomultiplicador. La emisión es detectada como una corriente electrónica y será amplificada y leída directamente en un dispositivo de carátula, o bien en un graficador. El etileno deberá ser de grado puro. (Siguiendo las instrucciones de la Norma Mexicana NOM-036-ECOL-1993).

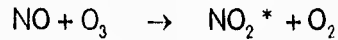
Las reacciones que se efectúan son las siguientes:



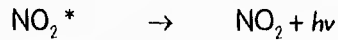
### Determinación de los óxidos de nitrógeno NOx.

Es por medio del método de químicoluminiscencia el cual se efectúa en dos partes la primera parte se determina el monóxido de nitrógeno y la otra determina de una manera indirecta la cantidad de dióxido de nitrógeno. El método se basa en la reacción de químicoluminiscencia del óxido nítrico NO y O<sub>3</sub> en el cual se genera energía, que es medida por un tubo fotomultiplicador. El NO<sub>2</sub> es evaluado indirectamente reduciéndolo previamente a NO por medio de un convertidor.

Cuando el NO reacciona con el O<sub>3</sub> se forma NO<sub>2</sub>\* en estado excitado teniéndose la reacción :



Posteriormente el NO<sub>2</sub>\* recuperará su estado estable emitiendo energía de la siguiente forma:



Esta energía tiene una banda característica de emisión de 600 a 2400 nm con un pico a 1200 nm, siendo su espectro de emisión de luz único para la reacción NO-O<sub>3</sub>.

La Intensidad de luz emitida por la reacción químicoluminiscente es proporcional a la cantidad de NO que reaccionó y por lo tanto se puede determinar su concentración en el aire. La medición de NOx se realizó previa reducción del NO<sub>2</sub> a NO con lo cual se determinará la cantidad de NO formado y el ya existente en la muestra. Como se señaló anteriormente, esta medición global dará como resultado las concentraciones sumadas de NO y NO<sub>2</sub> totalizados como NOx. La concentración de NO<sub>2</sub> es determinada electrónicamente calculando la diferencia de concentraciones del NO y del NOx. (Norma Mexicana NOM-037-ECOL-1993)



## BIBLIOGRAFÍA

"*A Recommended Air Pollution Index for Standardized Daily Reporting*", Report of the Federal Task Force on Air Quality Indicators, Council on Environmental Quality (1976)

*Air Pollution Control in the Mexico City Metropolitan Area. Phase I Results for the Short-Term Program Consolidate Draft Report.* 1991

"*Air Quality Criteria for Carbon Monoxide*" Environmental Criteria and Assessment office. Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C. 20460. 1989.

"*Air Quality Criteria for Nitrogen Oxides*" Public Health Services Environmental Public Health National Air Pollution Control Administration. Washington, D.C. Jan 1971.

"*Air Quality Criteria for Oxides of Nitrogen*" Draft. Do not cite or quote. June 1980.

"*Air Quality Criteria for Photochemical Oxidants*" Public Health Service Environmental Health Services National Air Pollution Control Administration. Washington, D.C. March 1970.

"*Air Quality Criteria for Particulate Matter.*" Public Health Service Environmental Health Services National Air Pollution Control Administration. Washington, D.C. Publication No. AP-49, January 1969.

"*Air Quality Criteria for Sulfur Dioxide.*" Public Health Service Environmental Health Services National Air Pollution Control Administration. Washington, D.C. May 1976.

"*El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)*" Secretaría del Desarrollo Urbano y Ecología. Corporación Internacional, TECNO CONSULT. (1986).

"*El Índice Mexicano de la Calidad del Aire (IMEXCA)*" . Subsecretaría del Mejoramiento del Medio Ambiente. Dirección General de Saneamiento Atmosférico. Memorandum Técnico-SMA/DGS At 102- 78.

"*EPA Measuring Air Quality. The New Pollutant Standards Index.* United States Environmental Protection Agency July 1978 OPA 11/8.

Babcock L.R., "*A Combined Pollution Index for Measurement of Total Air Pollution.*", J.Air Poll.

Control Assoc., 20 , 653 (1970).

Babor J., *Química General Moderna*, Ed. Marín S.A. México 1979.

Biselle, C.A., S.H. Lubore & R.P. Pukul, "*The National Environmental Indices: Air Quality and Outdoor Recreation*", MTR-6159, The Mitre Corporation, McLean, Va., 1972.

Subsecretaría del Medio Ambiente (SMA).Boletín Informativo. Año 1,No. 2 dic.1979.

Bravo Álvarez H., "*La contaminación del Aire en México*" Ed. Universo XXI. México. (1987)

Bravo ÁlvarezH., R. Magaña., "*The Mexican Index for Air Quality IIMEXCAJ*" UNAM. June 1979.

Bravo Álvarez H., R. Sosa, R. Torres y F. Perrin." *Incremento de la Contaminación Atmosférica por Ozono en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*". Ingeniería Ambiental. 1:1, Enero - Febrero 1988.

Bushtueva, D.A. "*New Studies of the Effect of Sulphur Dioxide and Sulphuric Acid Aerosol on Reflex Activity of Man*". In: Limits of Allowable Concentrations of Atmospheric Pollutants Book 5, Translate by B.S. Levine, U.S. Dept. of Commerce, Office of Technical Services; Washington, D.C., March 1962.

Chow J. "*Measurement Methods to Determine Compliance with Ambient Air Quality Standards for Suspended Particles*". Journal of the Air & Waste Management Association. 45:320-367. 1995.

Cralley , L.V. "*The effect of Irritant Gases upon the Rate of Ciliary Activity*". J.Ind Hyg.Toxicol., Vol.24, pp193 -198, 1942.

Czaja, A.T. "*Über die Einwirkung von Stauben, spieziell von Zementofenstaub auf Pflazen*". Angew. Botan., Vol.40, pp. 106-120, 1966.

Fensterstock J.C., K. Goodman et al. "*The Development und Utilization of Air Quality Index*", Paper No. 69-73, presented at the 62nd Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, June 1969

Goldstein, B.D. y O.J. Balchum. "*Effect of Ozono on Lipid Peroxidation in Red Blood Cell*". Proc. Soc. Expil. Biol. and Med., 126:1. 356-358. 1967.

Green, M.H., "*An Air pollution index based on Sulfur Dioxide and smoke shade*", J. Air Pollution Control Association. 11:703. (1966)

Heck, W.W., O.C. Taylor, and D.T. Tingey., "*Response of Plants to Acute Doses of Nitrogen Dioxide*". BioScience, 21 1971.

Hill, A.C. and J.H. Bennet., "Inhibition of Apparent Photosynthesis by Nitrogen Oxides". Atmos. Environ. 1970.

Hunt W, W.R. Ott et al., "The Pollutant Standards Index (PSI) An Early Warnig System for Air Pollution", Presented at the Eight International Scientific Meeting of the International Epidemiological association, Las Croabas, Puerto Rico, September 18-23 1977.

Inhaber, H., "A set of suggested Air Quality Indices for Canada", Atmos. Environ. 9:353 (1975).

Lacy R. *La Calidad del Aire en el Valle de México*. Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano, El Colegio de México.- 1993.

Lundgren. D.A., R.M. Burton.- "Effect of Particle Soze Distribution on the Cut Point Between Fine and Coarse Ambient Mass Fractions", Inhalation Toxicology 7 (1):131-148 .- 1995.

Memorias del Congreso Mundial Universitario. "Ecología. Realidad y Futuro" .1987

Memorias del Diplomado "Educación Ambiental". CCH Sur. PUMA. UNAM. 1992.

Migeotte, M.V. "The Fundamental Band of Carbone Monoxide al 4.7 mm in the Solar Spectrum". Phys. Rev. 75: 1108 -1109, 1949.

Miller T.L., "Short Time Avering Relationships to Air Quality Standards (STARAQs)- A Predictive Air Quality Index Madel for Used by Air Pollution Control Agencies", Paper No. 73-351, presented at the 66th Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, June 1973.

"M.U.R.C. index tells Detroiters how dirty air is", Air Eng. 10(6):28 (1968)

Secretaría de Desarrollo Social e Instituto de Ecología. *Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental*.- 1993-1994.

*Programa para el Control de Emisiones de Contaminantes al Aire Provenientes de la Industria en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. - Comisión Metropolitana para la prevención y control de la COnaminación Ambiental en el Valle de México. 24 de marzo de 1992.

Quadri de la Torre. "La Ciudad de México y la Contaminación Atmosférica". Ed. Limusa. México 1992.

Ott, Wayne R & Gary C. Thom, "A critical review of Air Pollution Index System in the United States and Canada" J.Air Pollution Control Association. 26:460 (1976).

Pierce G.J., "An Effect of Cement Dust on Oranges Trees." Plant Word, Vol. 13, pp.283-288, 1960.

Rich, T.A. " *Air pollution studies aided by overall air pollution index*", Environ.Sci. Technol. 1:796 (1967)

Schnurer, L. and Haythorn, R.S. " *The Effects Smoke of Know Composition on the Animals*". Am. J. Pathol., Vol. 13, pp 810.1937.

Shenfeld L.,- " *Note on Ontario Air Pollution Index and Alert System*", J.Air Pollution Control Assoc., 20. 612 (1970).

Thom G.C.& W.R. Ott, " *Criteria for a Uniform International Air Pollution Index*". Presented at the 4th International Clean Air Congress, Tokyo, Japan, May 16-20, 1977. U.S. Environmental Protection Agency Washington, D.C. 20460.

Thom G.C. & W.R. Ott, " *A Proposed Uniform Air Pollution Index*", Atmos. Environ 10:261 (1976).

Thom, Gary C., y Wayne R. Ott., " *Air Pollution Indices: A Compendium and Assessment of Indices Used in the United States and Canada, joint study supported by the Council on Environmental Quality and the U.S. Environmental Protection Agency*", December 1975 and reprinted by Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich., 1975.

Thomas, W.A.,L.R., Babcock Jr., & Shults, " *Oak Ridge Air Quality Index*", ORNL-NSF-EP-8; Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn; September 1971

Thompson, C.R., et al., " *Effects of Continuous Exposure of Navel Oranges to NO* .Atmos. Environ. In Press, (1970)