



GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL
México, la Ciudad de la Esperanza



Informe del Estado de La Calidad del Aire y Tendencias 2003 para La

Zona Metropolitana del Valle de México



LIC. ANDRÉS MANUEL LÓPEZ OBRADOR
Jefe de Gobierno del Distrito Federal

DRA. CLAUDIA SHEINBAUM PARDO
Secretaria del Medio Ambiente

DR. J. VÍCTOR HUGO PÁRAMO FIGUEROA
Director General de Gestión Ambiental del Aire

M. EN C. RAFAEL RAMOS VILLEGAS
Director de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

BIÓL. ROBERTO MUÑOZ CRUZ
SUBDIRECTOR DE ANÁLISIS E
INFORMACIÓN

**TÉC. ARMANDO RETAMA
HERNÁNDEZ**
SUBDIRECTOR DE MONITOREO
ATMOSFÉRICO

ING. ALEJANDRO RÍOS MEJÍA
SUBDIRECTOR DE SISTEMAS DE
INFORMACIÓN

ELABORACIÓN

BIÓL. ROBERTO MUÑOZ CRUZ
ACT. CRISTINA ORTUÑO MOJICA
ING. GERARDO SAMUEL LÓPEZ
VENEGAS
BIÓL. MÓNICA DEL CARMEN JAIMES
PALOMERA
TÉC. MARÍA GUADALUPE GRANADOS
GUTIÉRREZ
GEÓG. VICENTE PÉREZ NÚÑEZ

COLABORACIÓN

TÉC. ARMANDO RETAMA HERNÁNDEZ
ING. ALEJANDRO CAMPOS DÍAZ

DISEÑO DE PORTADA

D.G. EDGAR ROJAS RUIZ

AGRADECIMIENTOS

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA DE LA UNAM (CCA)
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y CAPACITACIÓN AMBIENTAL (CENICA)
DIRECCIÓN GENERAL DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN HIDRÁULICA (DGCOH)
PETRÓLEOS MEXICANOS (PEMEX)
SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (SMN)

PRESENTACIÓN

Disfrutar de un aire limpio que garantice nuestra salud, así como contar con información veraz y oportuna sobre la calidad del aire, son derechos de los habitantes de la Ciudad de México. Por esta razón el gobierno de la ciudad tiene como objetivo disminuir gradualmente los niveles de contaminación del aire, mediante acciones integrales enmarcadas en el Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002–2010 (PROAIRE 2002-2010).

Entre las acciones para controlar las emisiones vehiculares destacan el programa Hoy No Circula, el programa de Verificación Vehicular, el mejoramiento de combustibles y la introducción de equipos para disminuir emisiones (convertidores catalíticos y retrofit); en el control de emisiones industriales destacan los programas de autorregulación y la disminución de emisiones, y en la conservación de los recursos naturales sobresale el Programa de Ordenamiento Ecológico. El PROAIRE 2002-2010 tiene un sistema de evaluación continua que permite conocer los avances del mismo.

La evaluación de los efectos a la salud humana y el monitoreo continuo de los niveles de contaminación, son instrumentos que permiten calificar el desempeño del PROAIRE 2002-2010, lo cual se respalda con el acceso y difusión de la información a la población.

En este orden de ideas me complace presentar el tercer “Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2003 para la Zona Metropolitana del Valle de México”, elaborado durante la administración del Lic. Andrés Manuel López Obrador. La información que contiene actualiza el conocimiento acerca de la evolución de los principales contaminantes atmosféricos y su comportamiento con relación a las normas de protección de la salud, a fin de evaluar el desempeño de las acciones contenidas en el PROAIRE 2002-2010. Destaca la mejora paulatina que ha tenido la calidad del aire con respecto a ozono, ya que en la actualidad en 31% de los días del año no se sobrepasa el límite que protege la salud para dicho contaminante, mientras que en 1991 esta frecuencia era del 3%. Además se mantiene un control sobre otros contaminantes criterio.

Al mismo tiempo se moderniza la infraestructura para medir las concentraciones de los contaminantes que impactan a la salud humana, conforme a los hallazgos recientes de la investigación epidemiológica y toxicológica y el desarrollo de nuevas tecnologías. De ahí que el 9 de agosto de 2003 se inaugurara la Red de Monitoreo de Partículas Menores a 2.5 micrómetros o PM_{2.5}, financiada por el Fideicomiso Ambiental Metropolitano (\$9.7 millones). Este informe incorpora los resultados de las primeras mediciones de PM_{2.5} realizadas durante 2003, contribuyendo así al conocimiento del comportamiento de este contaminante y proporcionando información que resulta de gran ayuda para el desarrollo de la investigación en contaminación del aire y salud.

Aunque todavía estamos lejos de respirar aire de calidad, la mejora obtenida hasta ahora indica una influencia positiva de las acciones llevadas a cabo.

Claudia Sheinbaum Pardo
Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	vii
RESUMEN EJECUTIVO	ix
CAPÍTULO 1. SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO	1
Importancia de la Red de partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	3
Efectos en la salud	3
Efectos en el ecosistema	3
Financiamiento de la Red de Monitoreo de PM _{2.5} en la Ciudad de México	3
Diseño de la Red de PM _{2.5}	3
Equipos de monitoreo	3
Difusión de la información de PM _{2.5}	4
CAPÍTULO 2. COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	5
Indicadores de calidad del aire	6
Técnicas para el análisis de tendencia	7
Eventos de emisiones extraordinarias de contaminación	7
Ozono	7
Óxidos de Nitrógeno	8
Partículas Suspendidas	9
Plomo en Partículas	10
Monóxido de Carbono	10
Dióxido de Azufre	11
CAPÍTULO 3. ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y SALUD	13
Indicadores	14
Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental	14
Promedio superior al límite permisible de O ₃ y PM ₁₀	14
Ozono	16
Partículas menores a 10 micrómetros	18
Partículas Suspendidas Totales y Plomo	20
Monóxido de Carbono, Dióxido de Nitrógeno y Dióxido de Azufre	21
CAPÍTULO 4. RED DE PM _{2.5}	23
Indicadores	23
Percentil 98	24
Media anual	24
Comparación de las mediciones de PM _{2.5} realizadas en la RAMA y la REDMA	24
Variación espacial	25
Comportamiento típico diario	26
CAPÍTULO 5. DEPÓSITO ATMOSFÉRICO	27
Indicadores	27
Concentración ponderada	27
Depósito húmedo	27
Flujo de masa total	28
Comportamiento de la precipitación pluvial	28

Comportamiento espacial de las concentraciones de iones en agua de lluvia	29
Comportamiento espacial del depósito húmedo	31
BIBLIOGRAFÍA	33

INTRODUCCIÓN

El Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias del Valle de México – 2003 actualiza los indicadores anuales empleados por la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, para evaluar el desempeño ambiental de las acciones de prevención y control de la contaminación del aire que lleva a cabo el Gobierno de la Ciudad en el marco del Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002-2010 (PROAIRE 2002-2010).

La aplicación de criterios técnicos garantiza la consistencia y confiabilidad de los indicadores de calidad del aire del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), los cuales se actualizan periódicamente y son de fácil acceso al público. Estos indicadores de calidad del aire proporcionan un panorama integral del estado de la contaminación del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), tomando en cuenta criterios de salud ambiental, el comportamiento temporal y espacial de los contaminantes, la influencia de variables meteorológicas y la presencia de fuentes de contaminación.

En el Capítulo 1 se describe la estructura actual del SIMAT y los cambios que se llevaron a cabo durante el año 2003, de acuerdo con los lineamientos de Fortalecimiento Institucional contenidos en el Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002-2010 (PROAIRE 2002-2010). También se describe la implantación de la nueva red de monitoreo de partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) en la ZMVM y la difusión de esta información por medio de un Sistema de Indicadores de Calidad del Aire.

En el Capítulo 2 se analiza la evolución de los contaminantes atmosféricos entre 1990 y 2003, se identifica su tendencia y el porcentaje de cambio como una medida indirecta del efecto de las acciones de prevención y control. El uso de diferentes indicadores para este análisis permite contar con un mejor panorama de la variación de cada contaminante, tomando en cuenta diferentes aspectos de su situación, como son: la evolución de concentraciones altas, concentraciones bajas, concentraciones típicas o concentraciones que reflejan su control.

En el Capítulo 3 se describe el estado que guarda la calidad del aire mediante indicadores vinculados a las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de protección a la salud y su representación espacial. En el caso del ozono (O₃) y las partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀), se analiza su situación considerando las diferentes épocas climáticas y se profundiza el análisis por medio de indicadores que mejoran la evaluación del riesgo a la salud, como es el caso del promedio móvil de 8 horas que establece la modificación a la norma de O₃.

En el Capítulo 4 se presenta un análisis comparativo de las primeras mediciones de PM_{2.5} realizadas con equipos manuales y automáticos, con el fin de conocer la evolución gradual que presentan sus concentraciones en ambas redes de monitoreo. También se evalúa el comportamiento espacial de las PM_{2.5} y el comportamiento típico diario, con el objetivo de identificar la región de la ZMVM y el período del día con mayor riesgo para la población que se expone al aire libre.

En el Capítulo 5 se describe el comportamiento de las concentraciones y depósitos medidos en muestras de agua de lluvia de la ZMVM, y su posible asociación con los niveles de acidez y las fuentes de emisión locales. También se presenta la distribución espacial y temporal de la precipitación pluvial durante la época de lluvias. El comportamiento espacial de los iones y del potencial de hidrógeno (pH), permite identificar la influencia de las fuentes de emisión y el posible riesgo que tienen los sistemas naturales, ante el fenómeno de lluvia ácida.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento integra el análisis de la información de calidad del aire registrada en la ZMVM. Los indicadores considerados permiten conocer el comportamiento y tendencia de los contaminantes entre 1990 y 2003, así como el estado de la calidad del aire en función de las normas de protección a la salud y la influencia de las condiciones climáticas. Los resultados para cada contaminante se resumen de la siguiente manera.

Ozono

Las concentraciones altas de O_3 que se registran en la ZMVM continúan con la tendencia a disminuir, el indicador para este tipo de concentraciones (percentil 90) durante el período 1990 – 2003 presenta un decremento promedio de 34% (tres puntos porcentuales más que en 2002). Esto indica que las acciones orientadas a la disminución de concentraciones altas de O_3 han tenido el impacto esperado, lo cual se observa en la disminución del número de veces en que se instrumenta el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA). Sin embargo, aun se presentan concentraciones máximas que superan el límite de la norma de protección a la salud; en 1995 se excedía en nueve de cada diez días y en 2003, en siete de cada diez días.

Este contaminante aún representa un riesgo para la salud de la población de la ZMVM, principalmente para quienes habitan y realizan actividades al aire libre en la región suroeste (delegaciones como Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan, Coyoacán y parte de Miguel Hidalgo, Benito Juárez y el municipio Huixquilucan), donde se concentran poblaciones superiores a 150,000 habitantes. Temporalmente, el riesgo es mayor en la época seca – caliente (marzo a mayo), dado que en ésta las violaciones al límite de la norma ocurren con mayor frecuencia.

Óxidos de Nitrógeno

Las concentraciones altas de dióxido de nitrógeno (NO_2), como precursor de O_3 , también han disminuido gradualmente desde 1990, destaca 2002 por no haber registrado concentraciones por arriba del valor límite establecido en la norma; en el caso de 2003 se registraron seis días con valores por arriba del límite establecido. El indicador para concentraciones altas (percentil 90) señala un decremento promedio de 26% entre 1990 y 2003 (10 puntos porcentuales más que en 2002).

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) continúan con un comportamiento irregular desde 1990, que impide detectar algún tipo de tendencia.

Partículas suspendidas totales

Las partículas suspendidas totales (PST) presentan una disminución considerable después de 1992, entre 1997 y 1999 un ligero aumento y en los años 2001 a 2003 registran las concentraciones mínimas desde 1990. Aún cuando no se presenta una tendencia, el comportamiento de todas las estaciones es similar (son homogéneas en su comportamiento). En seis de cada diez muestreos realizados en 2003, aun se rebasa el límite permisible de la norma de salud. El riesgo por niveles altos de este contaminante es mayor en la época seca-caliente, ya que al menos en ocho de cada diez muestreos se supera el valor límite permisible.

Partículas menores a 10 micrómetros

La evolución de las partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀) muestra un patrón irregular el cual no se presenta en todas las estaciones, es decir no hay un comportamiento homogéneo. No obstante, en los últimos tres años se presentaron las concentraciones de menor magnitud desde 1990. El valor límite de la norma se rebasa en uno de cada diez muestreos, principalmente en la época seca-caliente y seca-fría, las cuales representan un mayor riesgo a la población. La región que comprende la delegación Iztapalapa y los municipios de Nezahualcóyotl, Tlalnepantla y Ecatepec (de poblaciones mayores a 580,000 habitantes) continúa con niveles altos.

Partículas menores a 2.5 micrómetros

La implantación de la Red de PM_{2.5} involucra un proceso de mejora continua en el funcionamiento de sus equipos y la recopilación de información. Por esta razón, el número de registros de PM_{2.5} obtenidos mediante equipos manuales y automáticos aumentó en el cuarto trimestre de 2003. El análisis comparativo de las mediciones de PM_{2.5} realizadas con equipos automáticos y manuales, muestra la necesidad de instrumentar acciones para homologar sus mediciones, dado que el principio de operación de los equipos manuales es el método de referencia para medir partículas.

La información obtenida con equipos manuales durante el cuarto trimestre de 2003, permite evaluar el comportamiento espacial de las PM_{2.5} en la ZMVM. El análisis mediante dos indicadores (percentil 98 y promedio anual), no permite identificar con claridad áreas de mayor contaminación. El área donde se encuentra la estación XAL se destaca como un sitio con posible influencia de emisiones locales, por presentar los valores de mayor magnitud.

El análisis del comportamiento típico diario de las PM_{2.5}, con información de equipos automáticos obtenida entre agosto y diciembre de 2003, indica la presencia de concentraciones altas entre las 8:00 y 16:00 horas, con valores máximos alrededor de las 13:00 horas.

Plomo contenido en PST y PM₁₀

En la ZMVM, el comportamiento del plomo (Pb) contenido en PST y PM₁₀ presenta una tendencia decreciente desde 1990, con decrementos superiores al 90% en concentraciones altas y típicas. Asimismo, dado que no se excede el límite permisible de la NOM para Pb en PST desde 1993, la calidad del aire evaluada para este contaminante no representa mayor riesgo en la salud de los habitantes.

Monóxido de Carbono y Dióxido de Azufre

El comportamiento de las concentraciones altas de monóxido de carbono (CO), presenta una disminución consistente desde 1990. Entre 1990 y 2003 la magnitud de este tipo de concentraciones disminuyó 62% (cinco puntos porcentuales más que en 2002). Asimismo, en los últimos tres años no se ha rebasado el valor límite permisible establecido en la NOM.

El impacto de los eventos extraordinarios de dióxido de azufre (SO₂) en los años 2000 y 2001, se ve disminuido por el comportamiento de las concentraciones en 2002 y 2003, de esta manera se presenta una tendencia homogéneamente decreciente en las concentraciones típicas, pero no así en las concentraciones altas.

La presencia de eventos extraordinarios en los años 2002 y 2003 fue menor en frecuencia y magnitud que los años previos, lo cual influyó para que no se superara la norma de protección a la salud de 24 horas ni la norma anual como criterio de exposición crónica, aun cuando las estaciones de monitoreo Tlalnepantla (TLA) y Atizapán (ATI), localizadas en el Estado de México, registraron la mayoría de estos eventos.

Depósito Atmosférico

Los niveles de mayor acidez en agua de lluvia se presentan en la región suroeste de la ZMVM, los valores de pH registrados oscilan entre 5.1 y 5.9 (menos ácidos que en años previos). En esta zona se registran los depósitos máximos de SO_4^{2-} y NO_3^- , los cuales están asociados a los principales precursores de la acidez (SO_2 y NO_x). Esta región comprende las delegaciones Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan, Coyoacán y el municipio Huixquilucan, del Estado de México.

Por su parte, los depósitos de CO_3^- y Cl^- con mayor nivel se registran en la región noroeste, que comprende las delegaciones Gustavo A. Madero, Azcapotzalco y parte de Miguel Hidalgo y de Cuajimalpa de Morelos, así como los municipios Tultepec, Atizapán de Zaragoza, Tlalnepantla, Naucalpan y Huixquilucan.

CAPÍTULO 1. SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) tiene por misión vigilar y evaluar el estado de la calidad del aire en la Ciudad de México, para informar oportunamente a sus habitantes como medida de salud pública, y fortalecer la toma de decisiones en programas de prevención de la contaminación.

El número de estaciones y parámetros medidos en el SIMAT ha cambiado a lo largo del tiempo. El 9 de agosto de 2003 se inauguró la red de partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}). Con la medición de este contaminante se moderniza, fortalece y amplía el SIMAT, de acuerdo con los lineamientos de Fortalecimiento Institucional contenidos en el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002 – 2010 (PROAIRE 2002–2010). Mediante equipos automáticos la Red de PM_{2.5} proporciona concentraciones promedio de este contaminante cada hora del día, lo que permite conocer su distribución espacial y temporal. También se realizan muestreos periódicos con equipos manuales para comparar las concentraciones medidas contra el límite propuesto en el Proyecto de Norma de Protección de la Salud.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros que se registran actualmente en las 4 redes de monitoreo que conforman al SIMAT (RAMA, REDMET, REDMA, REDDA). En la columna Equipos se especifica el número de estaciones con equipos automáticos y manuales que conforman la Red de PM_{2.5}, los cuales se incorporarán a la RAMA y a la REDMA respectivamente. En el Mapa 1 se muestra la ubicación del número total de estaciones con que cuenta el SIMAT, incluyendo las estaciones de la Red de PM_{2.5}. La página electrónica del SIMAT cuenta con información detallada de cada estación de monitoreo, como son: dirección física, coordenadas geográficas, parámetros, características del entorno, etc.

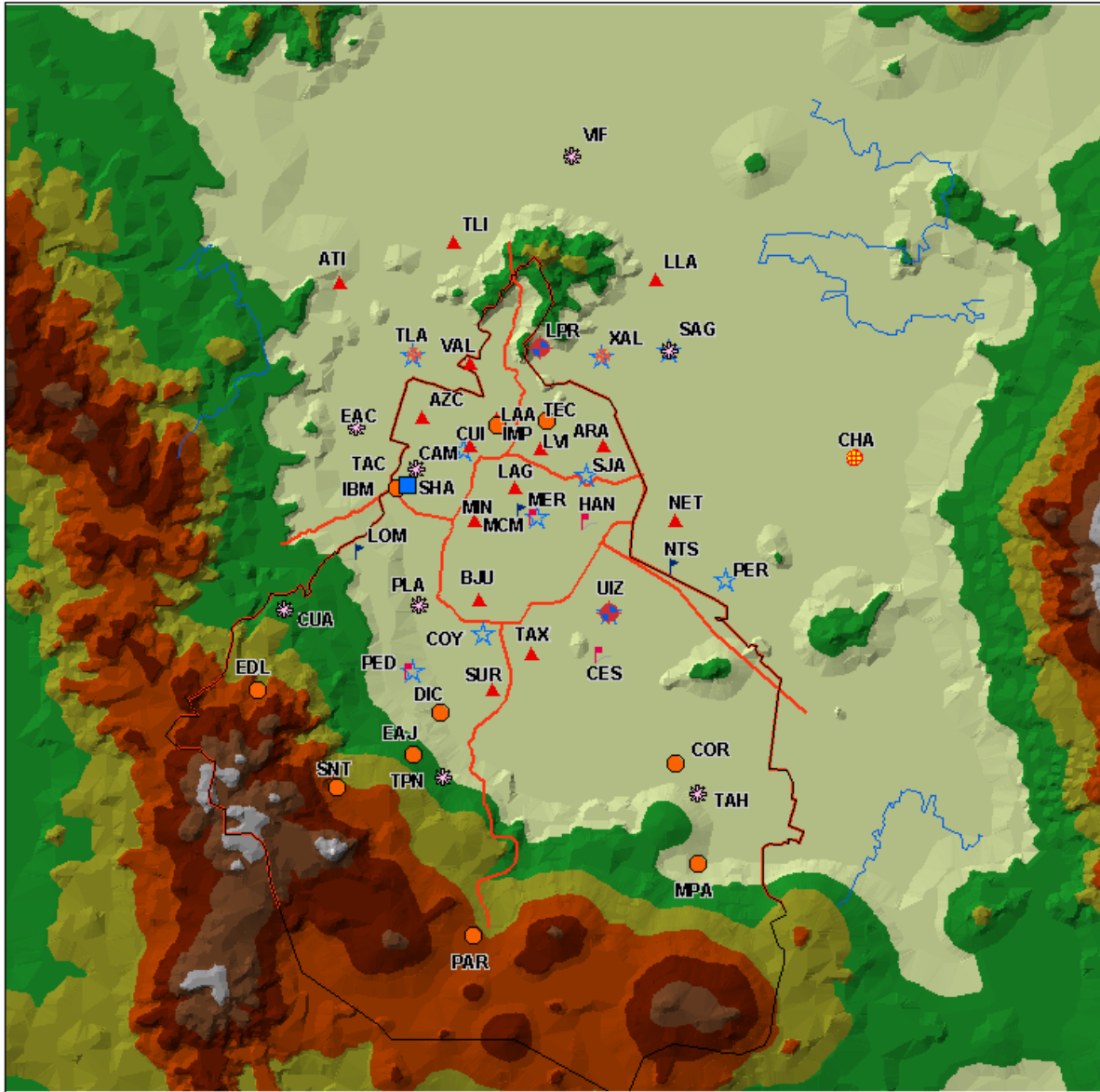
Tabla 1. Parámetros que registra el SIMAT, 2003.

Red	Número de estaciones	Parámetros
Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)	32	Ozono (O ₃), óxidos de nitrógeno (NO ₂ , NO _x y NO), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO ₂) y partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀).
Red Meteorológica (REDMET)	15	Velocidad del viento (VV), dirección del viento (DV), humedad relativa (HR), temperatura ambiente (TMP), radiación solar UV-A (UVa) y radiación solar UV-B (UVb).
Red Manual (REDMA)	19	Partículas suspendidas totales (PST), PM ₁₀ , plomo (Pb), NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ y metales (Cd, Cu, Fe, Ni, Mn).
Red de Deposito Atmosférico (REDDA)	16	pH, conductividad específica, aniones (NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ y CO ₃ ²⁻) y cationes (NH ₄ ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y K ⁺).
Red de partículas menores a 2.5 micrómetros (Red PM _{2.5})	8 automáticas	Concentraciones horarias
	7 manuales	Concentraciones en muestreos de 24 horas cada 6 días

Las mediciones de PM₁₀ que realiza el SIMAT se llevan a cabo con equipos automáticos *TEOM* y *BETA* y equipos manuales de *Volumen Alto*¹, este último es el método de referencia definido por la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (US EPA, por sus siglas en inglés) y su empleo disminuye la posibilidad de errores en la medición. Por esta razón, la información de PM₁₀ que se emplea en este informe proviene de equipos manuales y no de los automáticos, los que sirven para hacer el seguimiento horario del contaminante. El SIMAT realiza adecuaciones técnicas para homologar la operación de equipos automáticos y manuales, en su página electrónica se presentan los resultados de este trabajo.

¹ El equipo de monitoreo de PM₁₀, con principio de operación de microbalanza oscilante *TEOM* (*Tapered Element Oscillating Microbalance*), determina continuamente la masa de las partículas mediante el cambio de frecuencia de oscilación debido al depósito de partículas recolectadas en un filtro. El monitor con principio de atenuación *BETA*, determina continuamente la concentración de partículas depositadas en un filtro, por medio de la absorción de un haz de radiación beta. Los equipos de *Volumen Alto* muestrean un flujo de aire de aproximadamente 1.13 m³/min (~1627 m³/día), a fin de obtener una muestra de partículas suficientemente representativa para su análisis gravimétrico y químico.

Mapa 1. Ubicación de las estaciones del SIMAT de la Ciudad de México (2003).



SIMBOLOGIA	
▲ RAMA	● RAMA, REDDA, REDMET
◆ RAMA, REDMA	✕ RAMA, REDMA, REDDA, REDMET
▬ RAMA, REDMA, REDMET	● REDDA
✱ RAMA, REDMET	■ REDMA
	▶ REDMA, REDDA
	★ REDPM2.5

SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE
GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL

NOROESTE	Vallejo	VAL	NORESTE	Los Laureles	LLA	SUROESTE	Santa Ursula	SUR	CENTRO	Lagunilla	LAG
	Tacuba	TAC		La Presa	LPR		Pedregal	PED		Merced	MER
	Enep Acatlán	EAC		La Villa	LVI		Plateros	PLA		Hangares	HAN
	Azcapotzalco	AZC		San Agustín	SAG		Cuajimalpa	CUA		Benito Juárez	BJU
	Tlalnepanitla	TLA		Xalostoc	XAL		Tlalpan	TPN		Insurgentes	MIN
	Inst. Mex. del Petróleo	IMP		Aragón	ARA		Lomas	LOM		Museo de la Cd. Méx.	MCM
	Tlittitlán	TLI		Netzahualcoyotl	NET		Diconsa	DIC	SURESTE	Cerro de la Estrella	CES
	Atizapán	ATI		Villa de las Flores	VIF		Ecoguardas Alusco	EAJ		UAM Iztapalapa	UIZ
	Legaria	IBM		Chapingo	CHA		Exconr. Desierto Leones	EDL		Taxqueña	TAX
	Lab. de Análisis Ambiental	LAA		Netzahualcoyotl Sur	NTS		Paires	PAR		Tláhuac	TAH
	Secretaría del Hacienda	SHA		Cerro del Tepeyac	TEC		San Nicolás Totolapan	SNT		CORENA	COR
	Camaronas	CAM		San Juan de Aragón	SJA		Coyoacán	COY		Milpa Alta	MPA
	Cuñahuac	CUI		La Perla	PER						

Fuente: GDF, Secretaría del Medio Ambiente, Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), 2004

Importancia de la Red de partículas menores a 2.5 micrómetros (PM2.5)

Las PM2.5 son un contaminante del aire constituido por material sólido o líquido con diámetro aerodinámico menor a 2.5 milésimas de milímetro, por lo que son invisibles a simple vista; sin embargo, son capaces de dispersar la luz y disminuir la visibilidad, permanecer en la atmósfera por largo tiempo y recorrer grandes distancias antes de ser removidas.

Algunas PM2.5, como las que provienen de vehículos diesel y de gasolina, se emiten directamente a la atmósfera por el uso de combustibles fósiles, otras se forman a partir de reacciones químicas de gases emitidos a la atmósfera, formando aerosoles de nitratos y sulfatos o de compuestos orgánicos. Las fuentes geológicas (suelo) y biológicas (polen) contribuyen en menor proporción a las concentraciones existentes de este tipo de partículas.

➤ Efectos en la salud

Por su tamaño las PM2.5 pueden ingresar y depositarse en las partes más internas del sistema respiratorio. Estudios recientes en diferentes ciudades del mundo muestran una asociación directa entre el aumento de las concentraciones de PM2.5 y el decremento de la función pulmonar, el incremento de visitas a salas de hospitales, agravamiento de afecciones pulmonares y cardiovasculares preexistentes, y la muerte prematura en personas que padecen estas afecciones.

La Secretaría de Salud Federal elaboró el Proyecto de Modificación a la Norma Oficial Mexicana (NOM-025-SSA1-1993) para proteger la salud de la población por exposición a concentraciones de PM2.5. Su aplicación será de carácter nacional. Esta norma tiene concordancia con la norma equivalente en vigor en los EUA. Los valores propuestos en la NOM son:

65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio de 24 horas

15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio anual

donde: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ = microgramos de PM2.5 por metro cúbico de aire muestreado

➤ Efectos en el ecosistema

Las PM2.5 en la atmósfera contribuyen a la acidificación del agua de lluvia, la cual altera la composición de los suelos y mantos acuíferos, afectando a los organismos vivos que dependen de estos sistemas. También deteriora los monumentos históricos y estructuras. La disminución de la visibilidad también puede considerarse como un factor de daño al ecosistema.

➤ Financiamiento de la Red de Monitoreo de PM2.5 en la Ciudad de México

En diciembre de 2001 se inició el diseño de la Red de PM2.5 mediante la aportación de 9.7 millones de pesos del Fideicomiso Ambiental Metropolitano. La Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal coordinó el proyecto con la colaboración del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA), la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco (UAM-X) y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) (Ramos, 2003; Rivera y Retama, 2003).

➤ Diseño de la Red de PM2.5

La selección de sitios para las estaciones de monitoreo requirió la realización de una campaña de muestreo en 80 puntos distribuidos en cuatro zonas de la Ciudad de México. En cada sitio se realizaron muestreos durante períodos de 15 días en 5 ocasiones distintas (cada 3 días) durante un año, con el propósito de identificar su variación temporal y espacial en diferentes condiciones climáticas. Mediante geoestadística se evaluó la variación anual de los resultados de la campaña para determinar así los sitios representativos. La selección final contempló la facilidad de acceso, seguridad y disponibilidad de energía eléctrica. Las estaciones de esta red se listan en la Tabla 2 (Ramos, 2003; Rivera y Retama, 2003).

➤ Equipos de monitoreo

La complejidad de la composición y propiedades de las PM2.5, requirió evaluar el desempeño de los equipos automáticos de última generación, como son: el monitor de microbalanza oscilante

(Tapered Element Oscillating Microbalance – TEOM por sus siglas en inglés) acoplado a un sistema de recuperación de compuestos orgánicos volátiles (Filter Dynamics Measurement System – FDMS por sus siglas en inglés) y el monitor de atenuación Beta. El equipo manual empleado fue el muestreador de Flujo Bajo (16.7 litros por minuto) con la designación de método de referencia (Ramos, 2003; Rivera y Retama, 2003).

Tabla 2. Estaciones de monitoreo de la red de PM_{2.5} en la ZMVM, 2003.

Camarones	CAM	BETA	Coyoacán	COY	FLUJO BAJO
Coyoacán	COY	TEOM-FDMS	Merced	MER	FLUJO BAJO
Merced	MER	TEOM-FDMS	Pedregal	PED	FLUJO BAJO
La Perla	PER	BETA	San Agustín	SAG	FLUJO BAJO
San Agustín	SAG	BETA	Tlalnepantla	TLA	FLUJO BAJO
San Juan de Aragón	SJA	BETA	UAM Iztapalapa	UIZ	FLUJO BAJO
Tlalnepantla	TLA	TEOM-FDMS	Xalostoc	XAL	FLUJO BAJO
UAM Iztapalapa	UIZ	BETA			

Difusión de la información de PM_{2.5}

La información de PM_{2.5} que recopila el SIMAT se difunde oportunamente a los habitantes de la Ciudad de México a través de su página electrónica. Cada hora es posible conocer las concentraciones de este contaminante en las 8 estaciones mediante el mapa de PM_{2.5}. Además, mensualmente se puede descargar del sitio electrónico “base de datos (RAMA)”, la información registrada cada hora en las diferentes estaciones de monitoreo; el acceso es libre y el formato de la base de datos permite su manejo con la mayoría de las hojas de cálculo y manejadores de bases de datos.

Otra forma de difundir la información de PM_{2.5} es por medio de indicadores de estado y tendencia, los cuales se actualizan mensualmente en el Sistema de Indicadores de Calidad del Aire y Meteorología disponible en la página electrónica del SIMAT. Este sistema está disponible al público y es una herramienta que apoya la toma de decisiones al momento de evaluar la eficiencia de los programas de prevención y control de la contaminación del aire. El Capítulo 4 de este informe presenta el comportamiento de las PM_{2.5} registradas entre agosto y diciembre de 2003.

Finalmente, la información de PM_{2.5} se incorpora al plan de difusión de la información del SIMAT, por medio del cual se pretende mejorar el acceso a la información y sus productos, llevando la información directamente al usuario. Este plan comprende las siguientes acciones y productos:

- Consolidar la agenda de usuarios de información (actualmente son cerca de 1400 usuarios).
- Elaborar y enviar publicaciones electrónicas, como son el Informe ejecutivo de calidad del aire y el Informe mensual de calidad del aire².
- Actualizar y mantener la página electrónica del SIMAT (<http://sma.df.gob.mx/simat/>)
- Elaborar contenidos sobre calidad del aire para publicaciones regulares sobre el tema.
- Impartir talleres de sensibilización en contaminación del aire para estudiantes, profesores y público en general, los cuales tienen lugar en las instalaciones del SIMAT, escuelas, ferias y foros sobre temas ambientales³.

² El lector podrá solicitar su inclusión a la agenda de usuarios por medio del correo electrónico a la dirección calidadaire@sma.df.gob.mx

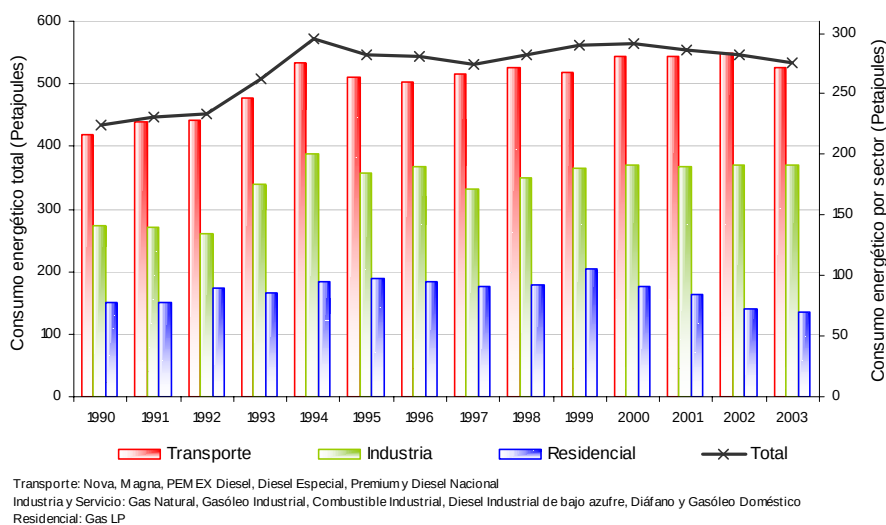
³ Los interesados podrán solicitar este taller vía correo electrónico a la dirección calidadaire@sma.df.gob.mx

CAPÍTULO 2. COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La eficacia de las acciones de prevención y control de la contaminación del aire en la ZMVM establecidas en el PROAIRE 2002–2010 y los programas precedentes –Programa Integral para el Control de la Contaminación Atmosférica (PICCA 1990–1994) y el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México (PROAIRE 1995–2000)– se refleja en el comportamiento de los contaminantes criterio⁴ que registra el SIMAT.

La ZMVM posee la mayor población del país, con más de 18.2 millones de habitantes (CAM, 2002). Para satisfacer sus necesidades esta población demanda actualmente un consumo energético cercano a los 534 petajoules, de los cuales el sector transporte demanda el 51%, seguido por el sector industrial con 36% y el sector residencial con 13% (Figura 1). Esta distribución del consumo energético por sectores se conserva con ligeras variantes desde 1990. A partir del año 2000 el consumo energético del sector residencial ha disminuido.

Figura 1. Distribución del consumo energético por sectores en la ZMVM (1990–2003).



Fuente: Datos proporcionados por PEMEX GAS Y PETROQUIMICA BÁSICA, PEMEX REFINACIÓN.

Conversión a Petajoules: Dirección de Inventario y Modelación de Emisiones DGGAA-SMA-GDF, 2004

El consumo energético mayor del sector transporte (fuentes móviles), se refleja en las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) y partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀), que se cuantifican en el inventario de emisiones (Tabla 3). Dentro de este sector los automóviles particulares destacan como los principales emisores de CO (40%), NO_x (27%) y compuestos orgánicos volátiles (COV) (18%), seguido de los vehículos menores a tres toneladas y taxis. Los tractocamiones destacan por emitir el 20% de las PM₁₀ y el 31% de las PM_{2.5}, mientras que los autobuses contribuyen con 9 y 14%, respectivamente (DIME, 2003).

Las industrias químicas, de productos derivados del petróleo y del carbón, del hule y del plástico, así como la industria textil destacan por su mayor emisión de SO₂. Las fuentes de área destacan por la cantidad de COV emitidos, dentro de este sector las fugas de gas LP representan un 5% (DIME, 2003).

⁴ Se denominan contaminantes criterio del aire a aquellas sustancias presentes en el aire ambiente que son abundantes, se encuentran en las zonas urbanas y para los cuales se han establecido concentraciones máximas permisibles (normas para protección de la salud), arriba de los cuales se tienen efectos nocivos a la salud. Los contaminantes criterio actuales son: ozono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, partículas suspendidas totales, partículas menores a 10 micrómetros y plomo.

Tabla 3. Inventario porcentual de emisiones anuales de la ZMVM, 2000.

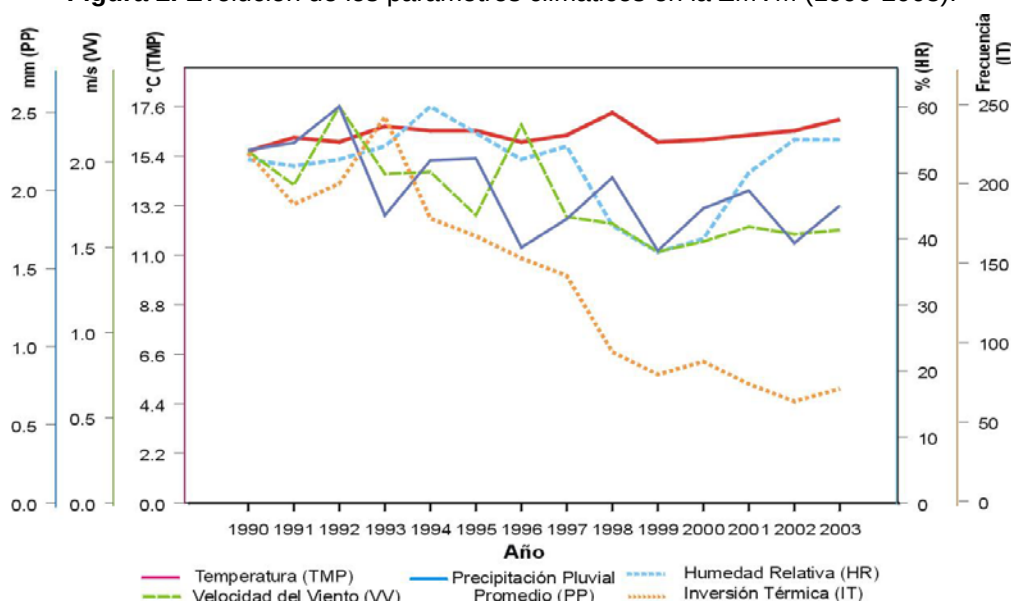
Fuentes puntuales	27.2	9.5	70.1	0.5	12.8	3.4	0.1	5.1	1.4
Fuentes de área	4.9	8.2	0.3	0.3	5.5	62.7	93.5	46.0	84.0
Fuentes móviles	51.1	76.0	29.6	99.2	81.3	31.6	6.4	45.3	14.6
Vegetación y suelos	16.8	6.3	NA	NA	0.4	2.3	NA	3.6	NA

Fuente: Dirección de Inventario y Modelación de Emisiones DGGAA-SMA-GDF.

NA: No Aplica

La variación de los parámetros climáticos que se registran en la ZMVM, permite explicar en parte el comportamiento de los contaminantes atmosféricos. En la Figura 2 se aprecia que la temperatura ambiente promedio ha aumentado ligeramente en los últimos 5 años, mientras que la humedad relativa presenta un comportamiento fluctuante desde 1990. La velocidad del viento promedio, la precipitación pluvial promedio y la frecuencia de inversiones térmicas⁵ muestran una tendencia a disminuir desde 1990.

Figura 2. Evolución de los parámetros climáticos en la ZMVM (1990-2003).



Fuente:

Datos de precipitación pluvial proporcionados por la DGCOH.

Datos de inversión térmica proporcionados por el SMN.

Datos de temperatura, velocidad del viento y humedad relativa proporcionados por la REDMET del SIMAT.

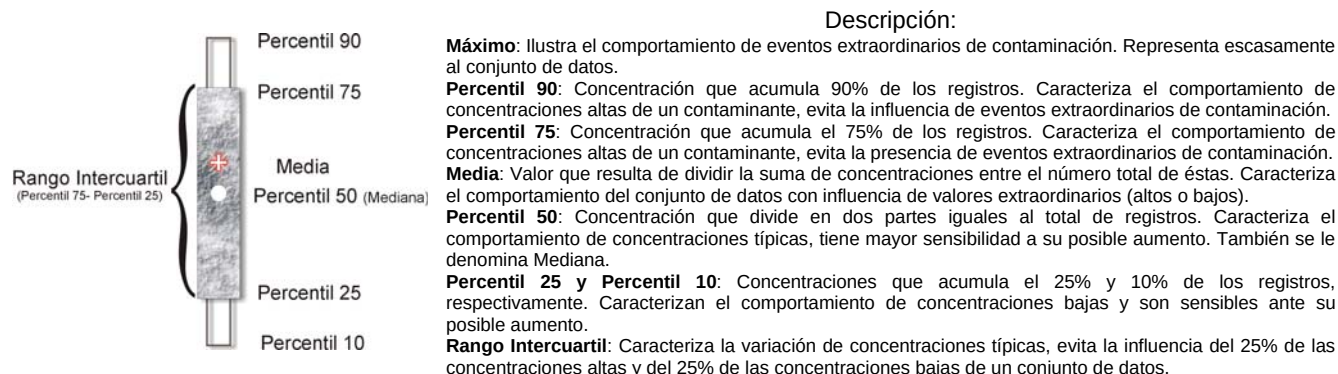
Indicadores de calidad del aire

El análisis de la evolución de los contaminantes atmosféricos requiere indicadores estadísticos confiables y que sean representativos del conjunto de datos, el uso de percentiles y la media como indicadores estadísticos permite caracterizar la información proveniente de las estaciones del SIMAT con mejor desempeño histórico⁶ e inferir la eficacia de las acciones de prevención y control. En la Figura 3 se ilustra el diagrama que representa al conjunto de datos mediante los indicadores usados en este informe, así como las concentraciones que caracteriza cada uno de estos.

⁵ El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) realiza dos radiosondeos diarios en el Observatorio Meteorológico. Antes de marzo de 1998 se llevaban a cabo en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, a partir de esta fecha en la sede del Observatorio Meteorológico en Tacubaya. Los datos del radiosondeo sirven, entre otras razones, para determinar la intensidad y temperatura de ruptura de las inversiones térmicas.

⁶ Las estaciones con mejor desempeño son las que registraron el 75% o más de los datos esperados en el año (desempeño anual bueno) y cuentan, desde 1990, con 75% o más de años en operación (desempeño histórico bueno).

Figura 3. Representación gráfica de algunos indicadores estadísticos.



Los indicadores de calidad del aire se elaboran conforme a criterios de suficiencia de información, que consideran el tipo de dato y el desempeño de las estaciones de monitoreo. Un Indicador se elabora con un tipo de dato específico, de acuerdo con el fenómeno de contaminación que representa y el equipo de medición del que proviene.

Técnicas para el análisis de tendencia

La prueba estadística de *Homogeneidad* (Gilbert O. R., 1987) permite comprobar que todas las estaciones de monitoreo presentan un comportamiento similar u homogéneo. Cuando hay homogeneidad se evalúa la presencia de tendencia⁷ mediante la *Prueba de Mann Kendall* (Gilbert O. R., 1987), que identifica el porcentaje de cambio que tiene un indicador durante el período analizado. Estas pruebas se aplicaron para los indicadores percentil 90, percentil 75, percentil 50 y la media. Cuando el resultado de ambas pruebas arroja un porcentaje de cambio negativo, indica que hay una *tendencia homogéneamente decreciente* en todas las estaciones, con un nivel de confianza de 95%.

Eventos de emisiones extraordinarias de contaminación

El Sistema de Avisos de Eventos de Emisiones Extraordinarias de Contaminación del SIMAT se implementó en el año 2000 para los contaminantes SO₂ y PM₁₀, y en 2003 para NO₂, con el objetivo de alertar a los tomadores de decisiones sobre la presencia de eventos extraordinarios de estos contaminantes. Esta información permite explicar su tendencia en los siguientes apartados.

OZONO

Las concentraciones máximas de O₃ tienen una disminución paulatina desde 1990 y en el año 2003 se registraron las concentraciones de menor magnitud (Figura 4). Este comportamiento se refleja en la *tendencia homogéneamente decreciente* de los 4 indicadores analizados (Tabla 4), donde el mayor porcentaje de cambio de 1990 a 2003 corresponde a las concentraciones que caracterizan el percentil 50 y la media (36%).

⁷ La tendencia es la evolución a largo plazo de una determinada variable, que permite apreciar su desplazamiento creciente o decreciente, considerando sus fluctuaciones cíclicas (El Pequeño Larousse Ilustrado, 2001).

Figura 4. Comportamiento de O₃ en la ZMVM, 1990–2003.

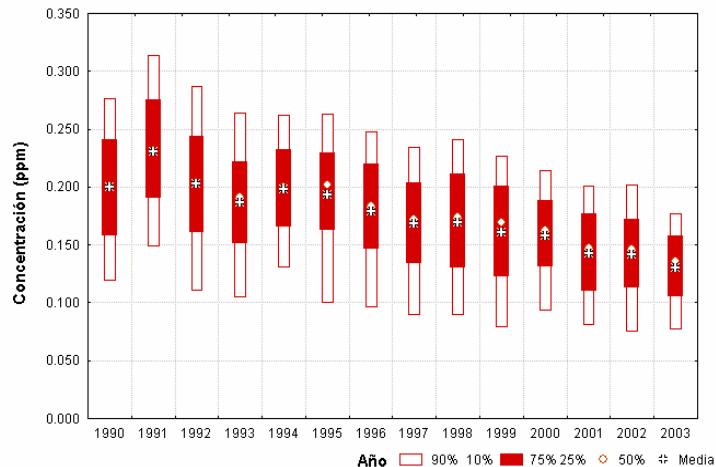


Tabla 4. Análisis de tendencia para O₃.

Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-34	-34	-36	-36

NOTA: El cambio negativo representa decremento

ÓXIDOS DE NITRÓGENO

La evolución de las concentraciones de NO₂ de 1990 a 2003, presenta una *tendencia homogéneamente decreciente* (Tabla 5). El mayor porcentaje de cambio se refleja en concentraciones altas (percentil 90) con 26%.

El comportamiento de las concentraciones de NO_x (NO + NO₂) en las estaciones de monitoreo no presenta homogeneidad⁸, lo que impide identificar una tendencia (Figura 5 y Tabla 5). El análisis del comportamiento de cada estación, mostró que la falta de homogeneidad se debe a que las estaciones Cerro de la Estrella, Tlalnepantla, San Agustín, Lagunilla y UAM Iztapalapa presentan un comportamiento que difiere del resto.

Figura 5. Comportamiento de NO₂ y NO_x en la ZMVM, 1990–2003.

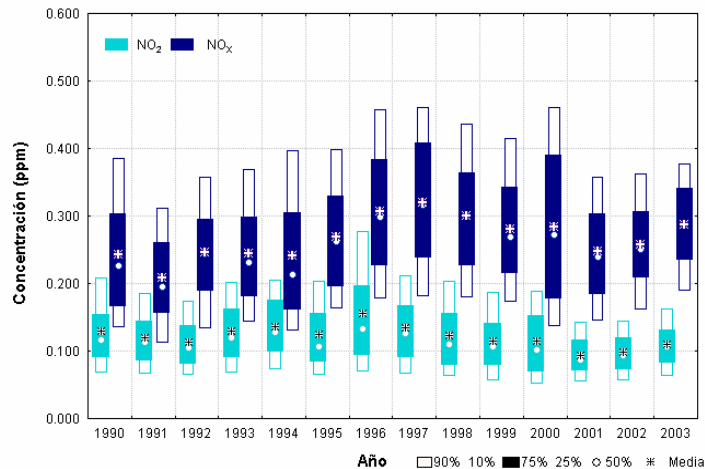


Tabla 5. Análisis de tendencia para NO₂ y NO_x.

Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-26	-23	-23	-24

Homogeneidad	No	No	No	No
Tendencia	—	—	—	—
Porcentaje de cambio	—	—	—	—

NOTA: El cambio negativo representa decremento

La presencia de eventos de emisiones extraordinarias de NO₂ (concentraciones horarias mayores o iguales a 0.200 ppm) en 2003 ocurrieron de manera aislada en la ZMVM (Tabla 6).

Tabla 6. Eventos de emisiones extraordinarias de NO₂ registrados en la ZMVM (2003).

MER	CE	2	0.222
TAC	NO	2	0.214
EAC	NO	1	0.209
UIZ	SE	1	0.229
TAX	SE	1	0.212

⁸ Es importante señalar que antes de 2001 no se contaba con métodos de validación para la información de NO_x.

PARTÍCULAS SUSPENDIDAS⁹

Los resultados del análisis de homogeneidad para PST (Tabla 7-a), indican que el comportamiento irregular que presentan desde 1990 (Figura 6-a) se generaliza en todas las estaciones de monitoreo. Con relación a la magnitud de las concentraciones de PST, en 1993 y 2001 se registró una disminución considerable; sin embargo, el valor del percentil 50 obtenido en 2001, 2002 y 2003, indica que la mitad de los muestreos tienen concentraciones superiores a 264, 271 y 301 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Las PM₁₀ presentan un comportamiento fluctuante desde 1990, con las concentraciones de menor magnitud registradas en los últimos 3 años (Figura 6-b). Los resultados del análisis de homogeneidad sugieren que este comportamiento de las PM₁₀ no se generaliza en todas las estaciones (Tabla 7-b). El percentil 50 de los años 2001, 2002 y 2003 indica que la mitad de los muestreos tienen concentraciones mayores a 98, 93 y 108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Figura 6. Comportamiento de partículas suspendidas en la ZMVM, 1990-2003.
a. PST

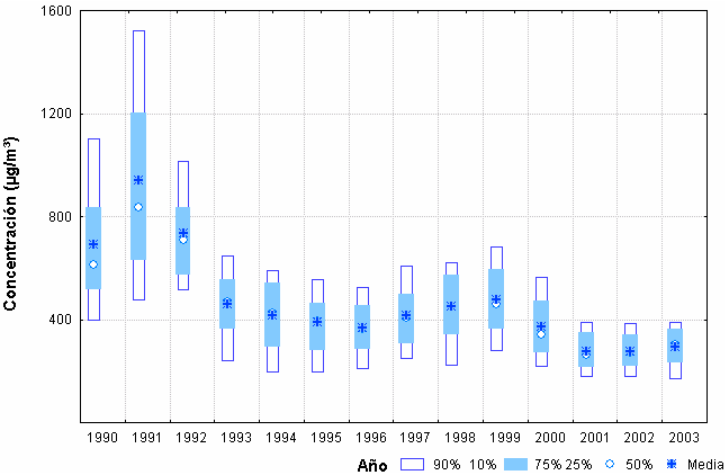
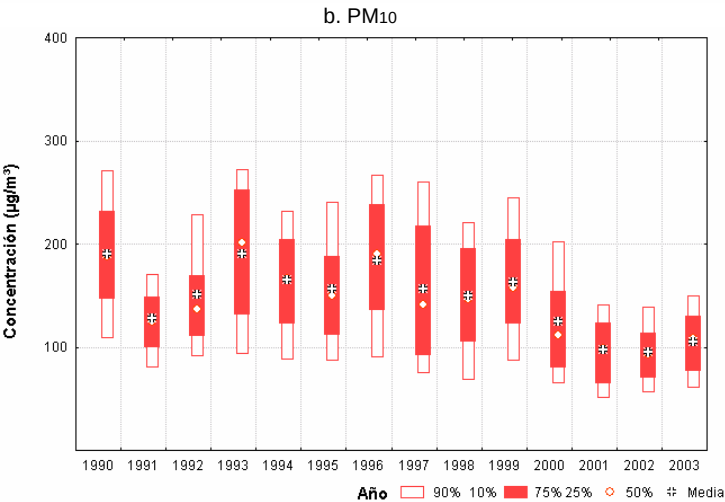


Tabla 7. Análisis de tendencia para partículas suspendidas.

a. PST				
Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	No	No	No	No
Porcentaje de cambio	--	--	--	--



b. PM ₁₀				
Homogeneidad	No	No	No	No
Tendencia	--	--	--	--
Porcentaje de cambio	--	--	--	--

La presencia de eventos de emisiones extraordinarias de PM₁₀ (concentraciones horarias mayores o iguales a 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) registrados con equipos automáticos¹⁰, indica una mayor frecuencia en las

⁹ Los muestreadores de Volumen Alto (REDMA) se usan como método de referencia y permiten caracterizar las partículas suspendidas. Con estos se obtienen muestras de 24 horas cada 6 días, posteriormente son analizadas en laboratorio para determinar las concentraciones usadas en la evaluación de tendencia y el cumplimiento de las Normas de Salud para partículas.

¹⁰ Los monitores de microbalanza oscilante (TEOM) y de atenuación BETA (RAMA) registran datos cada minuto en forma automática y continua, necesarios para la vigilancia y regulación ambiental al momento de detectar emisiones extraordinarias de contaminantes o implementar el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA).

estaciones Xalostoc (XAL), San Agustín (SAG), Villa de las Flores (VIF) y La Villa (LVI) localizadas en el noreste de la ZMVM (Tabla 8).

Tabla 8. Eventos de emisiones extraordinarias* de PM₁₀ registrados en la ZMVM (2000–2003).

2000	XAL	NE	2	271	2002	XAL	NE	27	659
2001	XAL	NE	39	721		CES	SE	8	535
	TLA	NO	2	606		EAC	NO	4	535
	VIF	NE	6	804		MER	CE	2	382
	EAC	NO	4	528		SAG	NE	2	407
	SAG	NE	2	354		TLI	NO	1	425
	TLI	NO	1	412		SUR	SO	1	391
	SUR	SO	1	312		HAN	CE	1	476
	CES	SE	1	304	2003	XAL	NE	24	866
						SAG	NE	7	774
						VIF	NE	5	398
						CES	SE	3	308
						LVI	NE	1	364
						TLI	NO	1	393

* Valores horarios de las concentraciones de PM₁₀

PLOMO EN PARTÍCULAS

El comportamiento del Pb contenido en PST y PM₁₀ de 1990 a 2003, presenta una *tendencia homogéneamente decreciente* en 4 indicadores, con porcentajes de cambio superiores al 90% (Tabla 9). El análisis de homogeneidad indica que este comportamiento ocurre en todas las estaciones. Las concentraciones de Pb disminuyen considerablemente entre 1990 y 1995, y permanecen bajo control de 1995 a 2003 (Figura 7 y Tabla 9). Esto se puede asociar con la implementación de medidas para su disminución y control, como es la eliminación paulatina del Pb en gasolinas.

Figura 7. Comportamiento del Pb contenido en partículas en la ZMVM, 1990-2003.

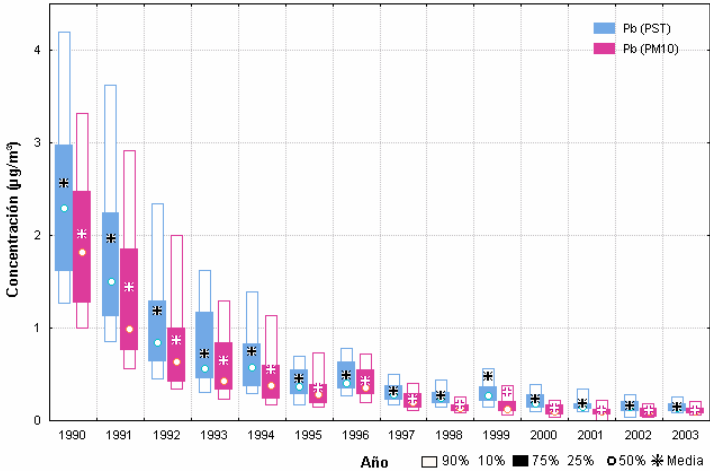


Tabla 9. Análisis de tendencia para Pb contenido en partículas.

Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-94	-94	-94	-94

Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-94	-95	-94	-94

NOTA: El cambio negativo representa decremento

MONÓXIDO DE CARBONO

El comportamiento de las concentraciones horarias de CO, muestra una disminución consistente entre 1990 y 1995, posteriormente muestra una disminución paulatina entre 1995 y 2003. En 2003 se registraron las concentraciones de menor magnitud desde 1990 (Figura 8).

El análisis de las concentraciones de CO por medio de los 4 indicadores, muestra un comportamiento con *tendencia homogéneamente decreciente* entre 1990 y 2003 e indica que el mayor decremento se registró en las concentraciones típicas que caracteriza el percentil 50, con 74% (Tabla 10). El análisis particular de las concentraciones de CO entre 1995 y 2003, conserva la *tendencia homogéneamente decreciente* en el comportamiento de los 4 indicadores; sin embargo, sus porcentajes de cambio son menores (Tabla 10).

Figura 8. Comportamiento del CO horario en la ZMVM, 1990-2003.

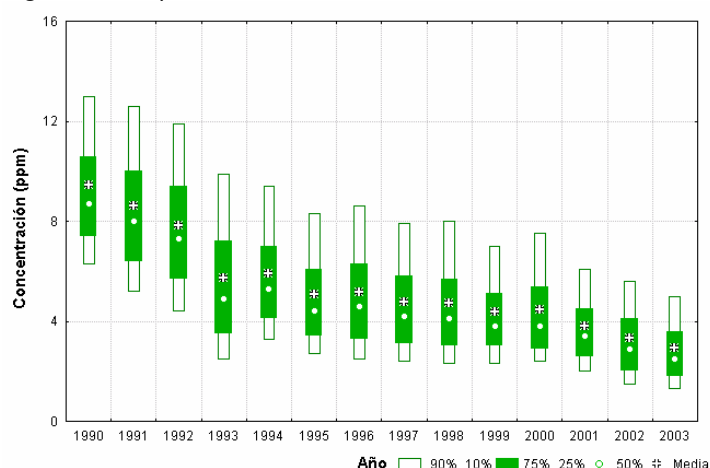


Tabla 10. Análisis de tendencia para CO.

Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-62	-69	-74	-67

Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-41	-44	-50	-51

NOTA: El cambio negativo representa decremento

DIÓXIDO DE AZUFRE

La ausencia de homogeneidad y tendencia en el análisis del percentil 90 entre 1990 y 2003 (Tabla 11), indica que las concentraciones altas de SO₂ no se registraron en todas las estaciones de monitoreo durante este período. Este comportamiento puede asociarse con el incremento de las concentraciones registradas en 2000 y 2001, dado que los indicadores percentil 75, 50 y la media, muestran una *tendencia homogéneamente decreciente* de 1990 a 2003. Es notable que en 2003 se registraron las concentraciones mínimas desde 1990 (Tabla 11 y Figura 9).

El análisis de las concentraciones de SO₂ en el período 1993–2003, para evitar la influencia que ocasionan los registros de 1990 a 1992 y evaluar la influencia de las concentraciones altas registradas en 2000 y 2001, muestra falta de homogeneidad en el comportamiento de los percentiles 90 y 75 (Tabla 11). Esto indica que las concentraciones altas de los años referidos sólo se registraron en algunas estaciones.

Figura 9. Comportamiento del SO₂ horario en la ZMVM, 1990-2003.

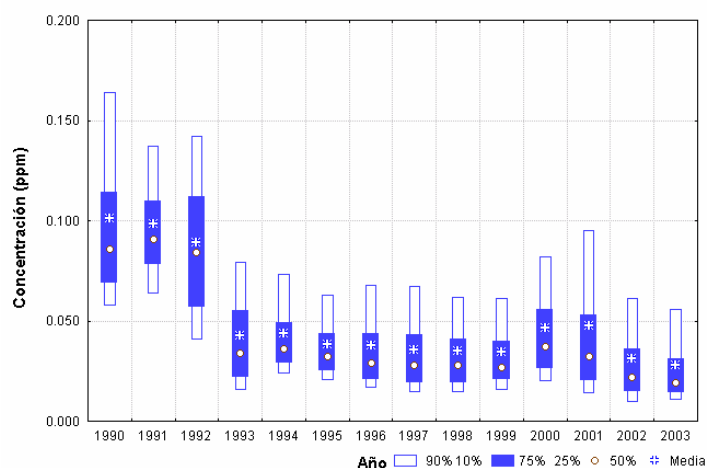


Tabla 11. Análisis de tendencia para SO₂.

Homogeneidad	No	Si	Si	Si
Tendencia	—	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	—	-70	-81	-68

Homogeneidad	No	No	Si	Si
Tendencia	—	—	Si	Si
Porcentaje de cambio	—	—	-47	-33

NOTA: El cambio negativo representa decremento

Lo descrito anteriormente se refleja en la presencia de los eventos de emisiones extraordinarias de SO₂ (concentraciones horarias mayores o iguales a 0.200 ppm) registrados en años recientes. En la Tabla 12 se listan los eventos registrados desde el 5 de diciembre de 2000 y las estaciones donde ocurrieron, prevaleciendo las que están localizadas en las zonas noroeste y noreste. Cabe señalar que en 2003 el 92% de los casos ocurrieron en el noroeste, la mitad de éstos se presentaron en las estaciones Tlalnepantla (TLA) y Atizapán (ATI).

Tabla 12. Eventos extraordinarios* de SO₂ registrados en la ZMVM (2000–2003).

2000	TLA	NO	2	0.400	2002	TLI	NO	8	0.202
	XAL	NE	1	0.131		TLA	NO	2	0.228
2001	TLA	NO	27	0.499		EAC	NE	2	0.210
	EAC	NO	3	0.481		XAL	NE	2	0.268
	XAL	NE	2	0.241		ATI	NO	2	0.218
	ATI	NO	2	0.373		SAG	NE	2	0.224
	TLI	NO	2	0.386		LLA	NE	2	0.207
	LPR	NE	2	0.273		PLA	SO	1	0.202
	LLA	NE	2	0.424		LVI	SE	1	0.263
	AZC	NO	1	0.289	2003	TLA	NO	3	0.233
						ATI	NO	3	0.282
						TLI	NO	2	0.344
						TAC	NO	2	0.283
						AZC	NO	1	0.201
						EAC	NO	1	0.210
						SUR	SO	1	0.281

* Valores horarios de las concentraciones de SO₂

CAPÍTULO 3. ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y SALUD

El objetivo general del PROAIRE 2002–2010 es proteger la salud de la población de los efectos causados por la contaminación atmosférica en la ZMVM, al implementar estrategias que permitan su reducción hasta alcanzar situaciones favorables y al evitar la exposición a concentraciones de riesgo.

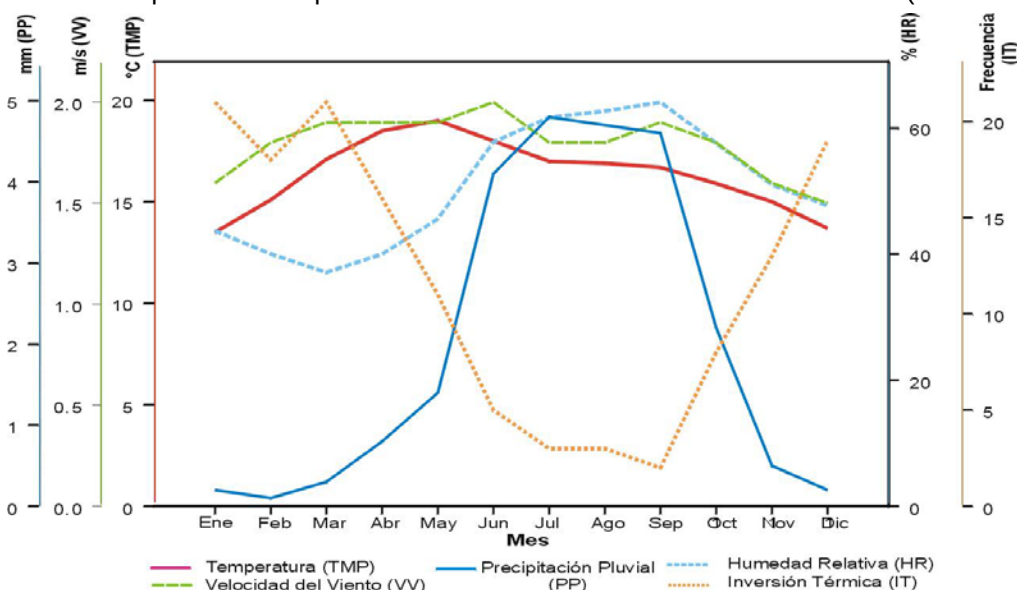
Los efectos en la salud asociados con la contaminación del aire, implican costos que afectan el bienestar de la población, debido a gastos de atención médica y pérdida de productividad laboral. El grado de afección difiere en cada persona, dependiendo de su predisposición genética, edad, nivel de nutrición, presencia y severidad de enfermedades cardíacas o respiratorias, duración y tipo de exposición, y concentración de los contaminantes¹¹. Los niños menores de 5 años, los adultos mayores y las personas con enfermedades respiratorias o asma, constituyen la población con mayor riesgo a la exposición de contaminantes (CAM, 1996; CAM, 2002; ECOURS, 2001).

El clima es un factor que influye en la presencia o dispersión de los contaminantes. A lo largo del año se distinguen en la ZMVM dos épocas climáticas: la época de *lluvias* (junio–octubre) se asocia con la afluencia de aire marítimo tropical con alto contenido de humedad, y la época de *secas* (noviembre–mayo), asociada con el flujo de aire polar con bajo contenido de humedad. La transición entre ambas épocas origina la división de la época seca en dos subépocas: *seca fría* (noviembre–febrero) y *seca caliente* (marzo–mayo).

En la Figura 10 se muestra el comportamiento típico mensual¹² de los parámetros climáticos en la ZMVM. La época de lluvias presenta alta precipitación pluvial, alta humedad relativa y baja frecuencia de inversiones térmicas. En la época seca se presenta escasa precipitación pluvial, baja humedad relativa, inversiones térmicas frecuentes y temperaturas fluctuantes.

La velocidad del viento es mayor en los 3 primeros meses de la subépoca seca fría (noviembre–enero) y menor en la subépoca seca caliente y el primer mes de la época de lluvias (junio).

Figura 10. Comportamiento típico mensual de variables climáticas en la ZMVM (1990–2003).



Fuente: Datos de precipitación pluvial proporcionados por la DGCOH.
Datos de inversión térmica proporcionados por el SMN.
Datos de temperatura, velocidad del viento y humedad relativa proporcionados por la REDMET del SIMAT.

¹¹ El efecto de la contaminación en la salud de las personas se asocia con el tipo de exposición que presentan: una *exposición aguda* se refiere a exponerse a concentraciones elevadas de contaminantes durante corto tiempo y una *exposición crónica* se refiere a exponerse a concentraciones relativamente bajas durante un largo plazo.

¹² El comportamiento típico mensual de las variables meteorológicas se construyó con la información meteorológica de 1990 a 2003.

Indicadores

Para inferir el impacto que tiene el estado de la calidad del aire en la salud de la población, se recurre a la evaluación de indicadores relacionados con los límites máximos permisibles establecidos en las *Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental (NOM)*, así como el *Promedio de las concentraciones que superan el límite permisible de la NOM*.

➤ Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental

El indicador empleado se refiere al porcentaje de días o muestreos al año, con valores arriba de los límites máximos permisibles definidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) para exposición aguda o crónica (Tabla 13).

Tabla 13. Normas Oficiales Mexicanas, Salud Ambiental ^{1a}.

Ozono (O ₃) (Modificación a la NOM-020-SSA1-1993) ^{1b}	0.11 ppm (1 hora) 0.08 ppm (máximo diario de promedios móviles de 8 horas)	1 vez al año 4 veces al año	
Monóxido de carbono (CO) (NOM-021-SSA1-1993)	11 ppm (máximo diario de promedios móviles de 8 horas)	1 vez al año	
Dióxido de azufre (SO ₂) (NOM-022-SSA1-1993)	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	
Dióxido de nitrógeno (NO ₂) (NOM-023-SSA1-1993)	0.21 ppm (1 hora)	1 vez al año	
Partículas suspendidas totales (PST) (NOM-024-SSA1-1993)	260 µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀) (NOM-025-SSA1-1993)	150 µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5}) ^{1c} (NOM-025-SSA1-1993)	65 µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	
Plomo (Pb) (NOM-026-SSA1-1993)	-----	-----	

^{1a} Publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 23 de diciembre de 1994.

^{1b} Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 30 de octubre de 2002.

^{1c} Proyecto de Modificación a la NOM-025-SSA1-1993, publicada en el Diario Oficial de la Federación en julio de 2002.

➤ Promedio superior al límite permisible de O₃ y PM₁₀

La mayor parte del año las concentraciones horarias de O₃ en la ZMVM superan durante varias horas al día el límite de protección que establece la norma de salud. Esto significa un mayor riesgo de exposición para la población. El indicador del *promedio superior al límite* de 0.110 ppm es una referencia indirecta que proporciona información de dicho riesgo a lo largo del año y se obtiene de la siguiente manera:

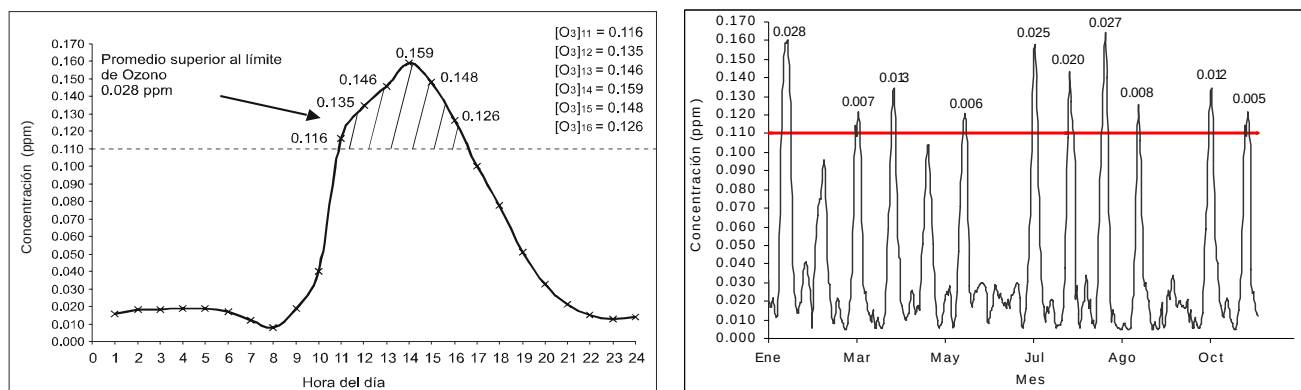
Promedio superior al límite permisible de O₃. Para los días en que se rebasó el valor de la norma, se obtiene el promedio superior al límite diario como la suma de las diferencias de los datos horarios del día ([Concentración]_{hr}) menos el valor límite de 0.110 ppm (Lp), dividida por el número de horas consideradas. El promedio superior al límite permisible anual, es el promedio de los promedios superiores al límite diarios. Las siguientes ecuaciones resumen el cálculo:

$$Prom.Sup.Lp_{día} = \frac{\sum ([Concentración]_{hr} - Lp)}{horas\ del\ día\ que\ se\ excede\ el\ límite\ permisible}$$

$$Prom.Sup.Lp_{año} = \frac{\sum (Prom.Sup.Lp_{día})}{días\ del\ año\ que\ se\ excede\ el\ límite\ permisible}$$

Un ejemplo del cálculo para O₃ es el siguiente: La Figura 11 muestra un día hipotético con 6 concentraciones horarias superiores a 0.110 ppm y un año hipotético con 10 promedios superiores al límite permisible.

Figura 11. Comportamiento diario y anual del O₃ en una estación hipotética.



El Promedio superior al límite del día se calcula de la siguiente forma:

$$Prom.Sup.Lp_{\text{día}} = \frac{(0.116 - 0.110) + (0.135 - 0.110) + (0.146 - 0.110) + (0.159 - 0.110) + (0.148 - 0.110) + (0.126 - 0.110)}{6} = 0.028 \text{ ppm}$$

El Promedio superior al límite del año se calcula de la siguiente forma:

$$Prom.Sup.Lp_{\text{año}} = \frac{0.028 + 0.007 + 0.013 + 0.006 + 0.025 + 0.020 + 0.027 + 0.008 + 0.012 + 0.005}{10} = 0.0151 \text{ ppm}$$

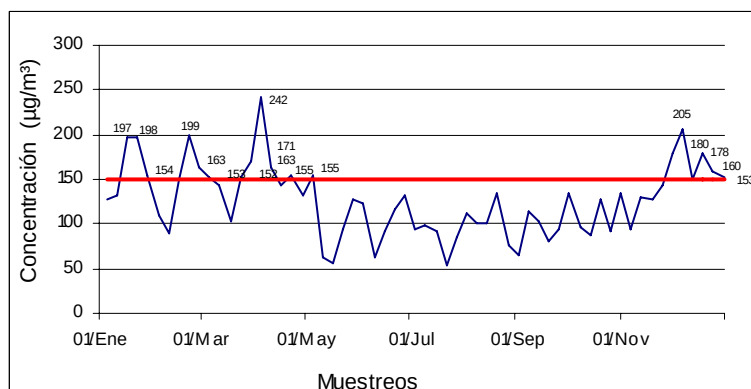
En el caso de las PM₁₀, el indicador del *promedio superior al límite* 150 µg/m³ también se obtiene de forma anual a partir de los muestreos de 24 horas. El indicador se construye de la siguiente manera:

Promedio superior al límite permisible de PM₁₀. Se obtiene como la suma de las diferencias de muestreos de 24 horas ([Concentración]_{muestreo}) mayores a 150 µg/m³ (Lp) y se divide por el número de muestreos considerados. La siguiente ecuación resume el cálculo:

$$Prom.Sup.Lp_{\text{año}} = \frac{\sum_{[Concentración]_{\text{muestreo}} > Lp} ([Concentración]_{\text{muestreo}} - Lp)}{\text{muestreos del año que se excede el límite permisible}}$$

Un ejemplo del cálculo para PM₁₀ sería el siguiente: La Figura 12 representa el comportamiento de las concentraciones registradas en muestreos de 24 horas de un año hipotético.

Figura 12. Comportamiento anual de muestreos de PM₁₀ en una estación hipotética.



El cálculo del promedio superior al límite de 150 µg/m³ se obtuvo de la siguiente manera:

$$Prom.Sup.Lp_{\text{año}} = \left\{ \begin{aligned} &(197 - 150) + (198 - 150) + (154 - 150) + (199 - 150) + (163 - 150) + (153 - 150) + \\ &(242 - 150) + (171 - 150) + (163 - 150) + (152 - 150) + (155 - 150) + (155 - 150) + \\ &(205 - 150) + (180 - 150) + (178 - 150) + (160 - 150) + (153 - 150) \end{aligned} \right\} \div 17 = 25 \mu\text{g/m}^3$$

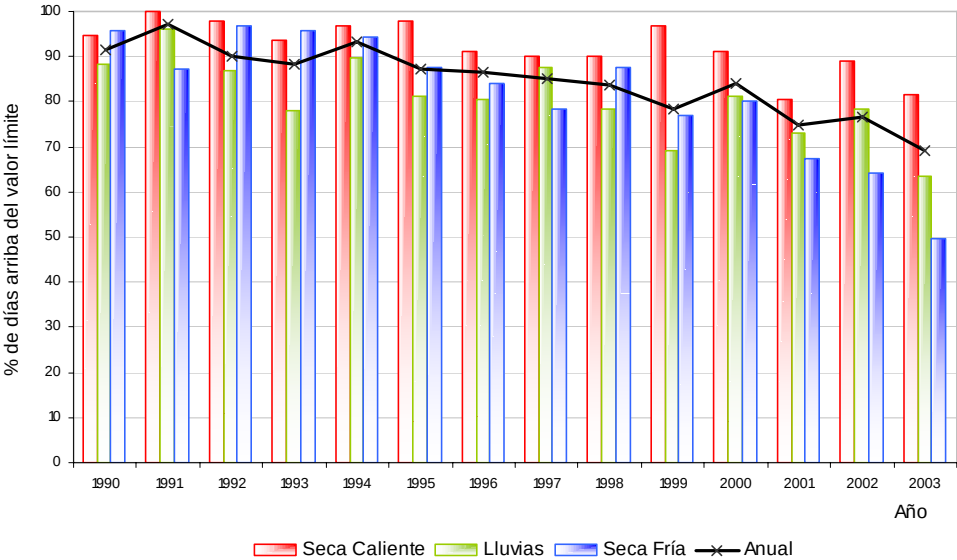
OZONO

La Modificación a la NOM-020-SSA1-1993, publicada en el Diario Oficial de la Federación del 30 de octubre de 2002, especifica dos límites para evaluar la calidad del aire con respecto al O₃ y proteger la salud de la población susceptible. El primero mantiene como concentración máxima el valor de 0.110 ppm, que no debe ser rebasada más de una hora una vez al año, y el segundo, una concentración menor o igual a 0.080 ppm del quinto máximo promedio móvil de ocho horas en un año.

La Figura 13 muestra la disminución paulatina del porcentaje de días con concentraciones de O₃ arriba del valor límite y señala a 2003 como el año con mayor porcentaje de días por debajo del límite en los últimos 14 años, con 31% (112 días).

Las concentraciones por arriba del valor límite de O₃ registradas en la época de lluvias y la época seca fría han disminuido paulatinamente. En 2003 se presentan los menores porcentajes desde 1990 (63% y 50%, respectivamente). La época del año que representa mayor riesgo en la salud de la población es la seca caliente, por presentar el mayor porcentaje (82%)¹³ de días por arriba del límite de O₃ (Figura 13).

Figura 13. Porcentaje de días al año arriba del valor límite de la NOM de O₃ en la ZMVM. Análisis anual y por épocas climáticas, 1990-2003.



La reducción del porcentaje de días arriba del valor límite, se refleja en el número de veces por año que se instrumentó el Plan de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA). En 2003 no se activaron Contingencias y en 2 ocasiones se activó la Fase de Precontingencia por O₃ (Tabla 14).

Tabla 14. Casos de Precontingencias y Contingencias Fase I y Fase II para O₃ en la ZMVM, bajo el esquema actual del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

	78	217	167	103	127	147	86	72	77	39	24	14	9	2
Precontingencia de O ₃	78	217	167	103	127	147	86	72	77	39	24	14	9	2
Contingencia Fase I de O ₃	--	2	4	13	1	5	3	3	4	3	0	0	1	0
Contingencia de O ₃ y PM ₁₀	--	--	--	--	--	--	--	--	0	0	0	0	0	0
Contingencia Fase II de O ₃	--	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Al evaluar el límite de la norma para promedio móvil de ocho horas (Tabla 15), se observa que en 2003 ninguna estación cumplió con el límite de 0.080 ppm como quinto máximo. Esto indica que el riesgo por exposición a concentraciones de O₃, durante lapsos continuos de ocho horas, se generaliza en la ZMVM.

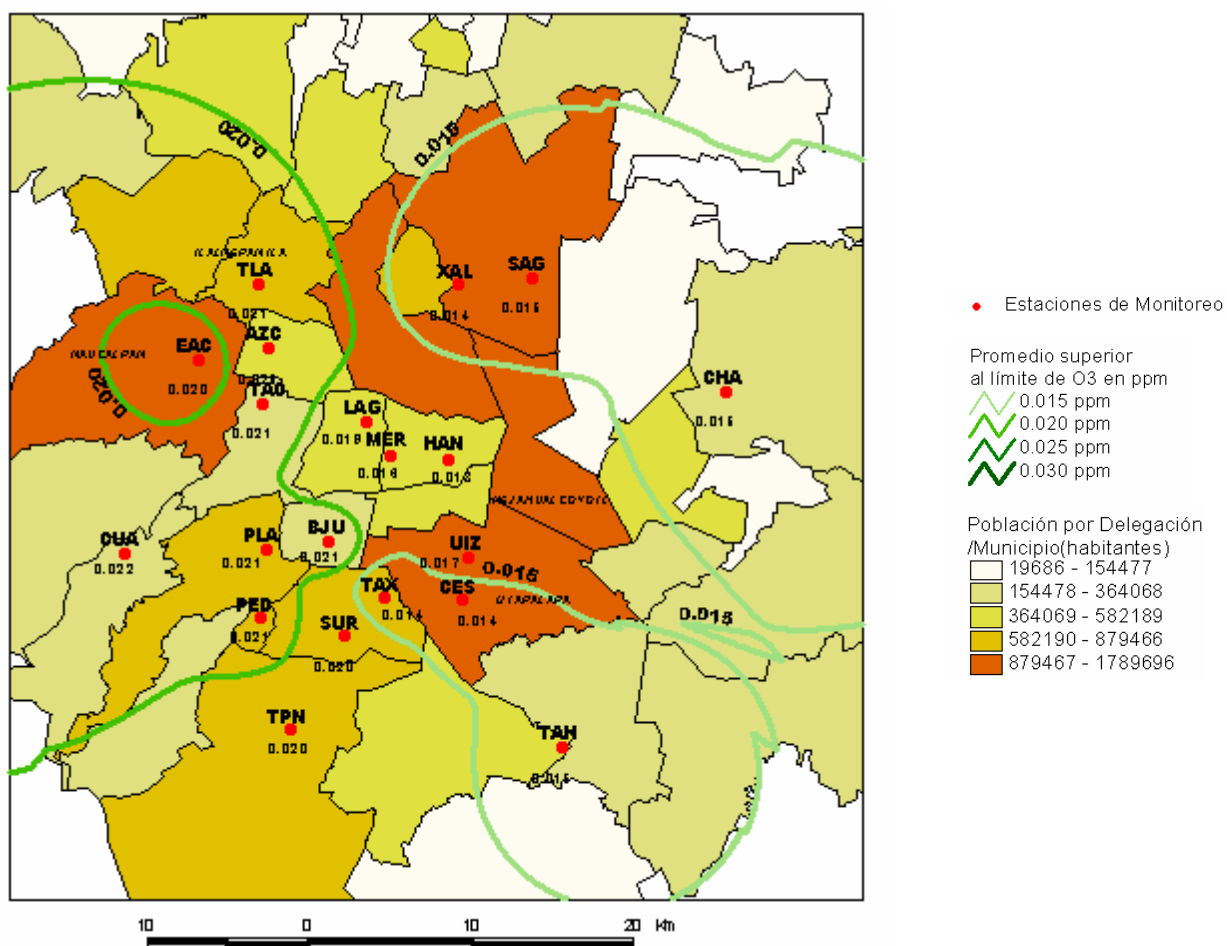
¹³ Estos porcentajes difieren de la información que proporciona el IMECA, el cual se genera con datos preliminares que no consideran el desempeño posterior de las estaciones.

Tabla 15. Máximos de promedios móviles de ocho horas de concentraciones de O₃, en 2003.

Máximo	0.138	0.153	0.170	0.149	0.150	0.115	0.155	0.116	0.167	0.142	0.132	0.154	0.124
Segundo Máximo	0.138	0.148	0.149	0.136	0.113	0.114	0.142	0.115	0.148	0.119	0.127	0.152	0.110
Tercer Máximo	0.137	0.138	0.143	0.124	0.112	0.112	0.142	0.112	0.142	0.113	0.127	0.142	0.109
Cuarto Máximo	0.135	0.136	0.141	0.123	0.109	0.112	0.137	0.109	0.141	0.108	0.125	0.141	0.105
Quinto Máximo	0.133	0.134	0.139	0.119	0.109	0.110	0.136	0.104	0.136	0.108	0.123	0.137	0.103

El cálculo del promedio superior al límite de O₃ en el 2003, indica valores que oscilan entre 0.012 y 0.022 ppm. Los valores máximos se obtuvieron en las delegaciones Cuajimalpa, Azcapotzalco, Benito Juárez, Miguel Hidalgo, Álvaro Obregón y los municipios de Tlalnepantla y Naucalpan, que concentran poblaciones superiores a 150,000 habitantes (Mapa 2). Este comportamiento sugiere que existe un riesgo mayor para la población de la región poniente del Valle de México, dado que se expone durante varias horas a concentraciones que superan el límite. La distribución espacial de 2003 refleja una disminución de dicho riesgo, al compararla con lo reportado en los años clave de la gestión de la calidad del aire (1990 y 1995). Con respecto al 2002, la mayoría de las estaciones de monitoreo presentaron decrementos en los promedios superiores al límite de O₃ con excepción de Chapingo (CHA), Azcapotzalco (AZC) y Tlalnepantla (TLA).

Mapa 2. Distribución espacial del promedio superior al límite de O₃, 2003.

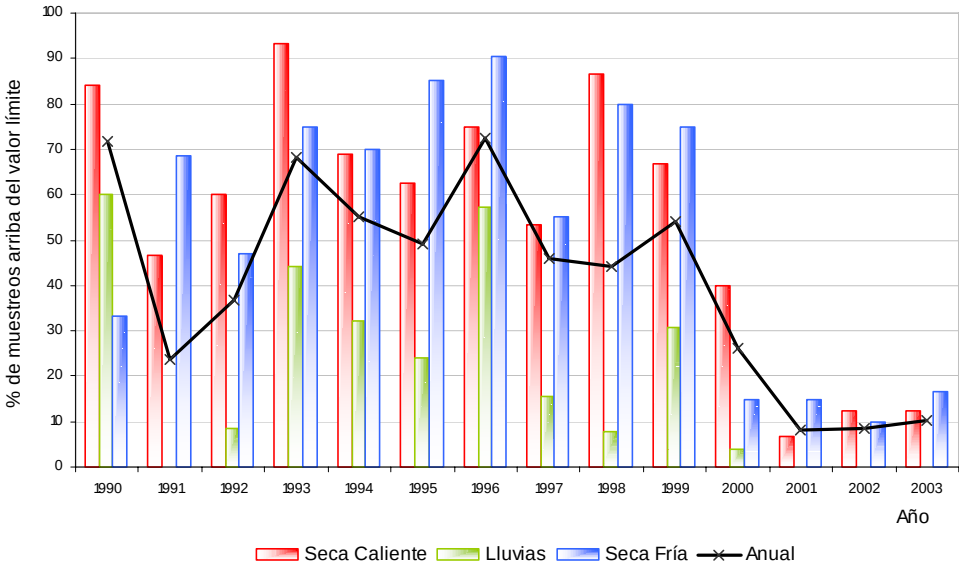


PARTÍCULAS MENORES A 10 MICRÓMETROS

La NOM-025-SSA1-1993 de salud ambiental establece dos límites para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a las PM₁₀, el primero evalúa la exposición aguda (150 µg/m³ en 24 horas) y el segundo la exposición crónica (50 µg/m³ como media aritmética anual).

La Figura 14 muestra una disminución considerable entre 1999 y 2001 del porcentaje de muestreos que superan el límite de la NOM. Los años con menos muestreos por arriba del valor límite son 2001, 2002 y 2003 que registraron 8, 8 y 10%, respectivamente. Estas excedencias ocurren en las épocas seca fría y seca caliente. Las concentraciones obtenidas durante las épocas de lluvias de 2001 a 2003 estuvieron abajo del valor límite permisible.

Figura 14. Porcentaje de muestreos al año arriba del valor límite de la NOM de PM₁₀ en la ZMVM
Análisis anual y por épocas climáticas, 1990-2003.



A pesar de que 2003 es uno de los años con menos muestreos de PM₁₀ superiores a 150 µg/m³, al evaluar el promedio anual¹⁴ se encuentra que aún excede significativamente el límite de 50 µg/m³ en la mayoría de las estaciones de monitoreo (Tabla 16). Esto indica que persiste un riesgo en la salud de los habitantes por exposición a PM₁₀ en la mayor parte de la ZMVM.

Tabla 16. Promedio aritmético anual (µg/m³) de muestreos de PM₁₀ en la ZMVM (1990-2003).

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
MÁXIMO	187	127	139	188	163	155	191	155	144	159	125	95	90	99
MÍNIMO	64.2	62.4	50.3	58.0	55.1	49.7	46.2	37.9	51.6	43.0	43.7	41.9	41.1	41.4
Estaciones que cumplen con la NOM	0	0	0	0	0	1	2	1	0	1	1	1	1	1

Con relación al límite anual (50 µg/m³), destaca que la estación Pedregal (PED) cumple con éste desde 1995, excepto en 1998, y que en 2003 los promedios de mayor magnitud se presentan en las estaciones Xalostoc (XAL) y Netzahualcóyotl Sur (NTS) de la zona noreste, con 99 y 90 µg/m³, respectivamente.

¹⁴ El promedio anual de PM₁₀ se calcula para cada estación de monitoreo de mejor desempeño, reportando el mínimo y el máximo de estos, y el número de estaciones que exceden el límite anual permisible. Los promedios anuales de PST y SO₂, se calcularon de igual manera.

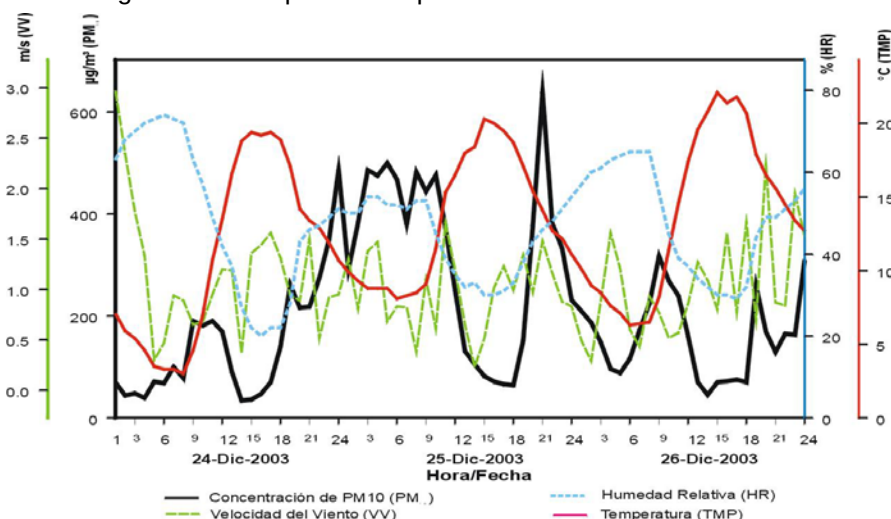
En 2003 se instrumentó el PCAA en su Fase de Precontingencia para PM₁₀, el día 1 de enero y en su Fase I de Contingencia, el día 25 de diciembre (Tabla 17). La posible causa de los niveles altos de PM₁₀ fue la quema de llantas y fuegos pirotécnicos durante los festejos del año nuevo y la navidad.

Tabla 17. Casos de Precontingencias, Fase I y Fase II para PM₁₀ en la ZMVM, bajo el esquema actual del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

Precontingencia de PM ₁₀	4	0	3	1	0	1
Contingencia Fase I de PM ₁₀	1	0	1	0	0	1
Contingencia de O ₃ y PM ₁₀	0	0	0	0	0	0
Contingencia Fase II de PM ₁₀	0	0	0	0	0	0

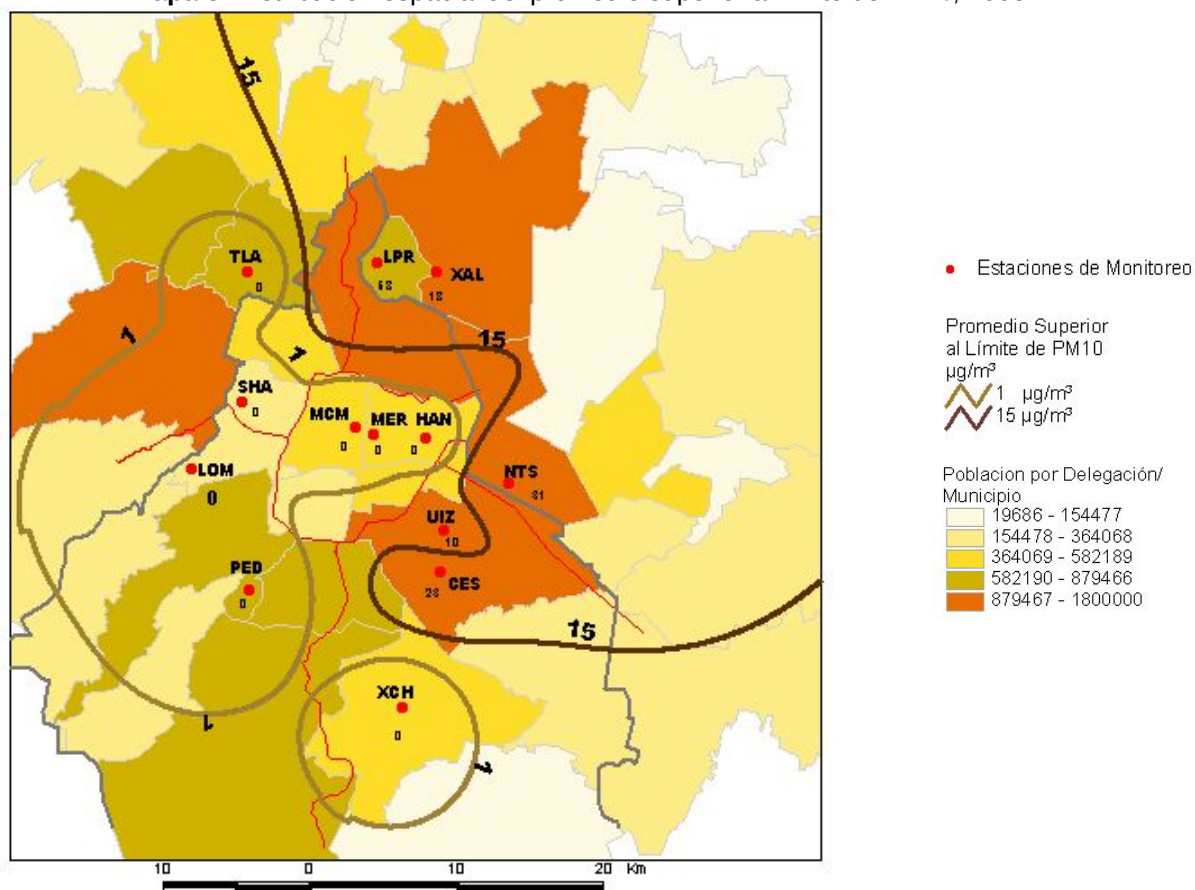
La Figura 15 muestra la evolución de las PM₁₀ y variables meteorológicas del 24 al 26 de diciembre de 2003. En ésta se observa que la velocidad del viento fue menor a 1.5 m/s en la madrugada del día 25 y la tarde del día 26, lo que pudo favorecer la acumulación de las partículas.

Figura 15. Contingencia Fase I por PM₁₀ aplicada el 25 de Diciembre de 2003 en la ZMVM.



El cálculo del promedio superior al límite de 150 µg/m³ para PM₁₀ (Mapa 3), indica que sólo las estaciones de monitoreo ubicadas en los municipios de Nezahualcóyotl, Tlalnepantla, Ecatepec y la delegación Iztapalapa (con poblaciones mayores a 580,000 habitantes), presentan valores que fluctúan entre 10 y 81 µg/m³. Este comportamiento identifica a la región oriente del Valle de México como la zona principal de riesgo para la población por exposición a PM₁₀. Al comparar estos resultados con los obtenidos en 2002, se observó un decremento de este indicador en la estación Hangares (HAN) y un incremento en La Presa (LPR), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro de la Estrella (CES) y UAM Iztapalapa (UIZ).

Mapa 3. Distribución espacial del promedio superior al límite de PM₁₀, 2003.



PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y PLOMO

La NOM-024-SSA1-1993 señala como límites para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a las PST, concentraciones de 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas (para exposición aguda) y 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como media aritmética anual (para exposición crónica). A pesar de que el porcentaje de muestreos superiores a 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PST (Figura 16) ha disminuído paulatinamente desde 1992, en 2003 se registraron más del 60% de los muestreos arriba del límite permisible. Los años con menos muestreos arriba de la norma son 2001, 2002 y 2003 con 56, 57 y 63%, consecutivamente.

La época seca caliente de 2003 presenta 83% de sus muestreos arriba de la norma, superando a las épocas seca caliente de 1996 (81%) y 1997 (73%). La época de lluvias de 2003 presenta 33% de sus muestreos arriba de la norma, seguida por las épocas de lluvias de 2001 (20%) y 2002 (20%). La época seca fría de 2003 es la que tiene el menor porcentaje de muestreos arriba de la norma, desde 1990 (67%).

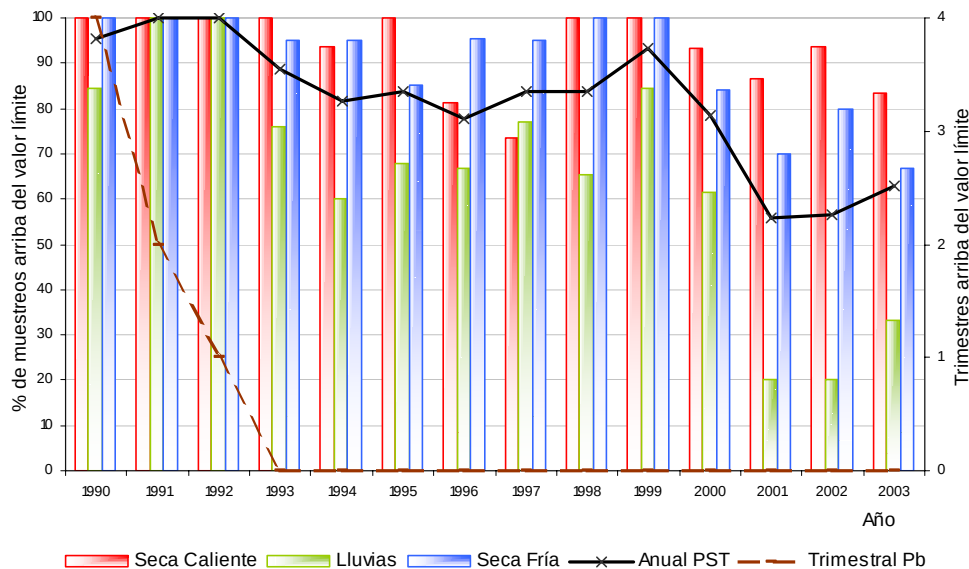
Con relación al promedio anual de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, aún se supera éste en todas las estaciones de monitoreo (Tabla 18). Esto puede representar un riesgo para la salud de la población por exposición continua, en toda la ZMVM.

Tabla 18. Promedio aritmético anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de muestreos de PST en la ZMVM (1990–2003).

MÁXIMO	639	957	702	433	413	375	365	405	431	466	369	277	276	293
MÍNIMO	125	130	91	108	101	100	109	92	156	140	127	96	94	94

Por su parte, la NOM-026-SSA1-1993 establece como límite permisible para exposición crónica de Pb, la concentración promedio de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en tres meses. Dicho valor no se excede desde 1993. (Figura 16)

Figura 16. Porcentaje de muestreos al año arriba del valor límite de la NOM de PST y trimestres arriba del valor límite de la NOM de Pb. Análisis anual y por épocas climáticas, 1990-2003.



MONÓXIDO DE CARBONO, DIÓXIDO DE NITRÓGENO Y DIÓXIDO DE AZUFRE

La NOM-021-SSA1-1993 especifica que la concentración del promedio móvil de 8 horas de CO no debe rebasar el valor permisible de 11 ppm una vez al año, a fin de proteger la salud de la población susceptible. Al evaluar el cumplimiento de esta norma (Figura 17) se observó una disminución paulatina del porcentaje de días arriba del valor límite entre 1990 y 2003. En 2003 se cumplen 3 años consecutivos sin registrar concentraciones diarias arriba de la norma.

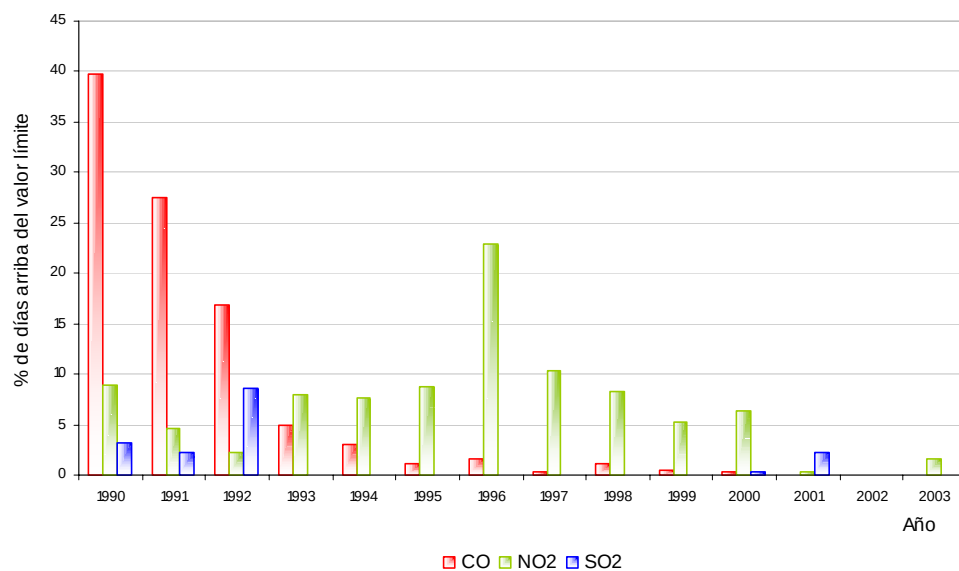
La NOM-023-SSA1-1993 especifica que el NO_2 , no debe rebasar la concentración promedio de 0.21 ppm en una hora una vez al año, para proteger la salud de la población. En la Figura 17 se observa la evaluación de esta norma desde 1990, destacando el año 2002 por no exceder el límite permisible y los años 2001 y 2003, por presentar menos días arriba de la norma (uno y seis días respectivamente).

La NOM-022-SSA1-1993 especifica que la concentración de SO_2 , como contaminante atmosférico, no debe rebasar los límites máximos normados de 0.13 ppm, en 24 horas una vez al año y 0.03 ppm como media aritmética anual, para proteger a la salud de la población. En 2002 y 2003 ambos límites se cumplieron, mientras que la excedencia de dichos límites en 2000 y 2001 se debió a la presencia de los eventos extraordinarios mencionados en el capítulo anterior (Figura 17 y Tabla 19).

Tabla 19. Promedio aritmético anual (ppm) de SO_2 en la ZMVM (1990-2003).

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
MÁXIMO	0.069	0.081	0.072	0.032	0.025	0.023	0.020	0.020	0.018	0.019	0.030	0.036	0.019	0.019
MÍNIMO	0.040	0.037	0.025	0.012	0.015	0.013	0.012	0.010	0.009	0.008	0.010	0.010	0.007	0.008
Estaciones que exceden la NOM	11	11	11	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

Figura 17. Porcentaje de días al año arriba del valor límite de la NOM de CO, NO₂ y SO₂ en la ZMVM, 1990-2003.



CAPÍTULO 4. RED DE PM2.5

La operación de la red de PM2.5 a partir del día de su inauguración (9 de agosto de 2003), conlleva la mejora continua en el funcionamiento de los equipos de monitoreo y la obtención de las concentraciones de este contaminante para su difusión. Debido a esta situación, las mediciones recopiladas durante el tercer trimestre son incompletas, mientras que en el cuarto trimestre aumentan. La información disponible en el tercero y cuarto trimestre de 2003, muestra un incremento importante en el número de datos registrados diariamente en el caso de la RAMA y en los muestreos registrados en la REDMA¹⁵ (Tabla 20).

Tabla 20. Número y porcentaje de datos diarios ó muestreos de PM2.5 en la ZMVM, 2003.

MER	50	54	82	89	7	47	15	100
TLA	60	65	87	95	8	53	15	100
COY	60	65	85	92	7	47	14	93
UIZ	59	64	92	100	7	47	14	93
SAG	61	66	91	99	8	53	15	100
SJA	43	47	82	89	NA	NA	NA	NA
PER	38	41	88	96	NA	NA	NA	NA
CAM	61	66	91	99	NA	NA	NA	NA
PED	NA	NA	NA	NA	8	53	14	93
XAL	NA	NA	NA	NA	7	47	13	87

NA: No Aplica

La evaluación del cumplimiento de la propuesta de norma para PM2.5 (NOM-025-SSA1-1993), requiere que cada estación de monitoreo cuente con un mínimo de 75% de los muestreos programados por trimestre y que en el año cuente con al menos 3 trimestres. Por esta situación, no es posible evaluar los límites de PM2.5 que establece la propuesta de norma con la información disponible; sin embargo, la información registrada permite comparar las mediciones realizadas con equipos automáticos y manuales, dado que los equipos de Flujo Bajo son el método de referencia y es necesario llevar a cabo las acciones necesarias para obtener concentraciones comparables con los equipos automáticos. La información disponible también permite conocer el comportamiento espacial y típico diario de las PM2.5 en la ZMVM. En el futuro se espera contar con más información para realizar un análisis de su variación temporal.

Indicadores

Los indicadores (percentiles y media aritmética) empleados para comparar las mediciones de equipos automáticos y manuales, se obtuvieron a partir de los promedios de 24 horas registrados en las mismas fechas. La información empleada corresponde al período agosto a diciembre del 2003.

El comportamiento espacial de las mediciones realizadas con equipos manuales, se evalúa por medio del Percentil 98 y la media anual de la información registrada en el cuarto trimestre de 2003. Estos indicadores se proponen en el proyecto de norma para evaluar efectos agudos y crónicos en la población, y se calculan de la siguiente forma:

¹⁵ Los equipos manuales realizan un muestreo cada seis días, por lo cual a lo largo de un año se tienen programados entre 60 y 62 muestreos. Los equipos automáticos tiene programado registrar los 365 ó 366 días del año. Los cuatro trimestre se dividen de la siguiente manera: enero-marzo, abril-junio, julio-septiembre y octubre-diciembre.

Percentil 98

1. Se ordenan los valores diarios de concentración obtenidos durante un año en una serie ascendente ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) en la que cada valor es igual o mayor que el valor anterior ($x_n \geq x_{n-1}$).
2. Se multiplica el número total de valores (n) por 0.98. Se toma la parte entera del valor resultante (i) y el valor del percentil 98 se calcula con la ecuación:

$$P_{0.98} = x_{i+1}$$

donde: $P_{0.98}$ = percentil 98
 i = parte entera del producto de n y 0.98
 x_{i+1} = $(i + 1)$ -ésimo número en la serie ordenada

3. El percentil 98 ($P_{0.98}$) es el valor de concentración con índice $i + 1$ en la serie ordenada de valores.

Media anual

1. Se calcula la media (o promedio) trimestral aplicando la siguiente ecuación:

$$\bar{x}_t = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} x_{i,t}$$

donde: $\bar{x}_t$ = promedio para el trimestre t
 n_t = número de datos diarios válidos en el trimestre t
 $x_{i,t}$ = concentración correspondiente al día i en el trimestre t

2. Posteriormente, la media anual se obtiene como:

$$\bar{x}_a = \frac{1}{n_a} \sum_{t=1}^{n_a} \bar{x}_t$$

donde: $\bar{x}_a$ = promedio anual
 n_a = número de trimestres válidos en el año.

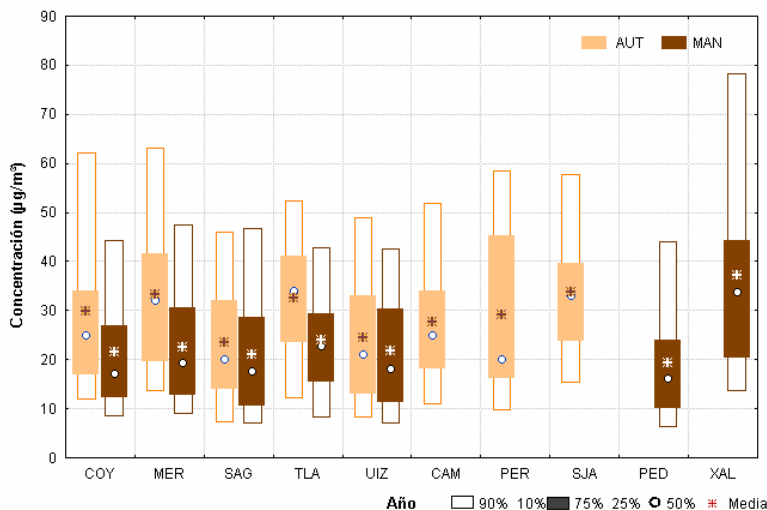
El comportamiento típico diario de PM_{2.5} con datos de la RAMA, se puede asociar a las actividades socioeconómicas de la ZMVM y permite identificar las horas del día con mayor riesgo para la población expuesta al aire libre. Este indicador se obtiene promediando las concentraciones registradas en cada hora del día. La información empleada corresponde al período agosto a diciembre de 2003.

COMPARACIÓN DE LAS MEDICIONES DE PM_{2.5} REALIZADAS EN LA RAMA Y LA REDMA

El análisis de las mediciones de PM_{2.5} en estaciones con equipos automáticos y manuales, indica que las concentraciones registradas con los primeros son mayores. Estas diferencias son notables en los casos de Coyoacán (COY) y Merced (MER), en menor magnitud también se aprecian en Tlalneantla (TLA).

En el caso de las estaciones que cuentan únicamente con equipos manuales, es notable la magnitud que alcanzan las concentraciones registradas en XAL. Por su parte, entre las estaciones que cuentan únicamente con equipos automáticos, destaca la estación La Perla (PER) por la dispersión que tienen las concentraciones que registra (Figura 18).

Figura 18. Comportamiento de PM_{2.5} en mismas fechas de medición de la red manual y automática, 2003.



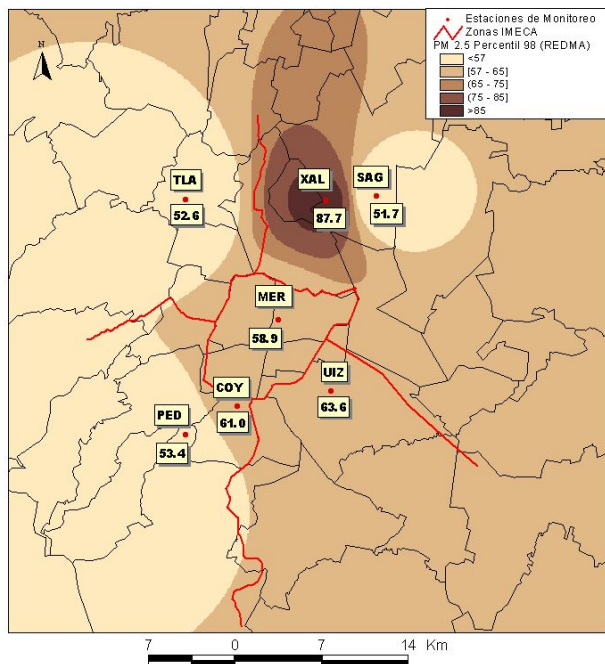
La diferencia de las concentraciones registradas en COY, MER y TLA, se puede asociar con el uso del dispositivo de recuperación de compuestos orgánicos volátiles (FDMS), acoplado a los equipos automáticos. Cabe mencionar que las estaciones San Agustín (SAG) y UAM Iztapalapa (UIZ), cuentan con equipos automáticos de atenuación BETA que carecen de este dispositivo.

VARIACIÓN ESPACIAL

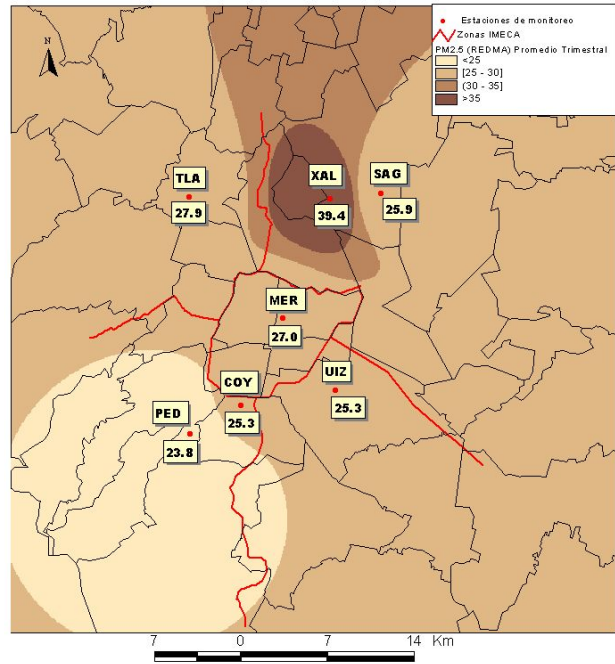
En el análisis de la distribución espacial de PM_{2.5} en la ZMVM mediante el percentil 98 (Mapa 4), se observa una variación general que oscila entre 51.7 y 63.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, destacando Xalostoc (XAL) como un sitio que registra concentraciones que pueden calificarse como “locales” (hot spots). Con relación al valor que alcanza este indicador, en general se puede calificar como “bajo” si lo comparamos con el límite de 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que propone el proyecto de norma, ya que solo el percentil 98 de la estación XAL lo rebasa.

En el caso de la distribución espacial de PM_{2.5} mediante el promedio anual, se observa un patrón similar al reportado con el percentil 98, destacando nuevamente XAL como un sitio con posible influencia de emisiones locales (Mapa 5). Con relación al valor de sus concentraciones, el promedio anual de XAL alcanza una magnitud de 39.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en el suroeste de la ZMVM se presentan concentraciones de menor magnitud, correspondiendo a la estación Pedregal (PED) el valor mínimo, con 23.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. No obstante, en comparación con el límite anual de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que propone el proyecto de norma, los valores del promedio anual se pueden calificar como “altos”.

Mapa 4. Distribución espacial del Percentil 98 de las PM_{2.5} registradas con equipos manuales, en 2003.



Mapa 5. Distribución espacial de la media trimestral de las PM_{2.5} registradas con equipos manuales, en 2003.



COMPORTAMIENTO TÍPICO DIARIO

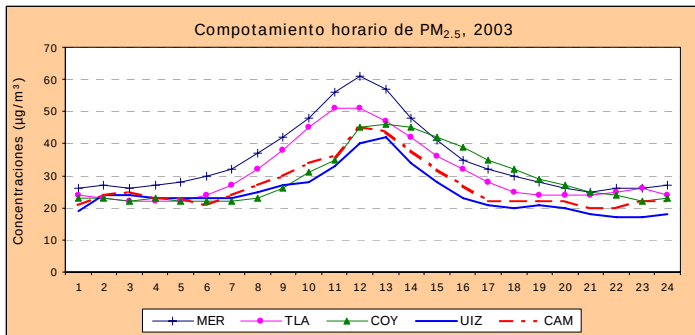
El comportamiento típico diario de las PM_{2.5} en las estaciones Merced (MER), Tlalnepantla (TLA), Coyoacán (COY), UAM Iztapalapa (UIZ) y Camarones (CAM) presenta concentraciones altas que varían gradualmente entre las 8:00 y 16:00 horas, con valores máximos alrededor de las 13:00 horas (Figura 19-a). La estación San Agustín (SAG) presenta un decremento entre las 12:00 y 15:00 horas, y un ligero aumento entre las 16:00 y 19:00 horas (Figura 19-b).

En las estaciones San Juan de Aragón (SJA) y La Perla (PER) se observa una variación gradual en las mediciones de PM_{2.5} entre las 8:00 y 16:00 horas aproximadamente, con concentraciones máximas alrededor de las 13:00 horas. No obstante prevalece en ambas estaciones un comportamiento irregular, una especie de zigzag, en horas consecutivas (Figura 19-b).

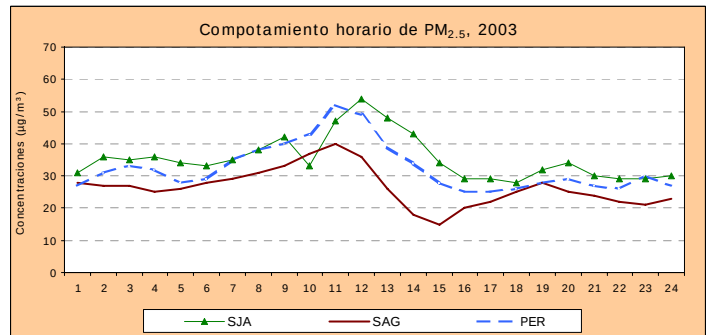
Cabe mencionar que SAG y SJA presentan un comportamiento distinto a las demás estaciones, por lo que es importante que en el futuro se investiguen las causas que provocan dichas variaciones.

Figura 19. Comportamiento típico diario de PM_{2.5} por estación de monitoreo.

a. Patrón similar



b. Patrones diferentes



CAPÍTULO 5. DEPÓSITO ATMOSFÉRICO

El *depósito atmosférico* es el proceso por el cual los gases, aerosoles¹⁶ y partículas que contaminan la atmósfera, son removidos de la atmósfera y depositados en la superficie de la Tierra. Cuando el transporte ocurre sin presencia de fase acuosa, por medio de fenómenos físicos como la adsorción, la absorción, la gravedad, el viento, etc., se denomina *depósito seco*. Cuando los contaminantes se disuelven en la humedad atmosférica y se depositan durante la precipitación pluvial¹⁷, se le llama *depósito húmedo* (GDF, 2002; Vet, 1991).

En condiciones naturales la lluvia presenta una ligera acidez (pH 5.6), provocada por el ácido carbónico (H_2CO_3) que se genera al estar en equilibrio el dióxido de carbono atmosférico (CO_2) y el agua (H_2O). La emisión de algunos contaminantes (SO_2 , NO_x y Cl), en combinación con la humedad atmosférica, propicia la formación de ácidos fuertes (H_2SO_4 , HNO_3 y HCl) que incrementan la acidez del agua de lluvia, originando el fenómeno conocido como *lluvia ácida*, *depósito ácido* o *precipitación ácida*. El monitoreo y cuantificación del depósito húmedo permite estimar la transferencia de contaminantes atmosféricos a los ecosistemas terrestres y acuáticos, ampliando el conocimiento sobre su flujo y dinámica atmosférica, como base para la definición de indicadores de lluvia ácida.

Indicadores

Los indicadores de este capítulo describen el comportamiento de las especies químicas analizadas en las muestras de depósito húmedo de 2003: sulfatos (SO_4^{2-}), nitratos (NO_3^-), cloruros (Cl^-), carbonatos (CO_3^{2-}), amonio (NH_4^+), sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+).

➤ Concentración ponderada

La concentración ponderada estima la cantidad de una especie química durante un período con múltiples eventos de precipitación pluvial (época de lluvias). Para su cálculo, se emplea la siguiente ecuación:

$$C_{\text{ponderada}} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

donde: $C_{\text{ponderada}}$ = Concentración ponderada de una especie química (mg/m^3)
 i = i -ésima muestra
 n = Número de muestras con información válida de concentración y precipitación
 C_i = Concentración de la especie química analizada en la i -ésima muestra (mg/m^3)
 P_i = Volumen de la i -ésima muestra (m)

➤ Depósito húmedo

El indicador del depósito húmedo (D_T) representa la masa promedio de una especie química depositada en una superficie durante la época de lluvias. Su estimación en un evento de precipitación, se obtiene multiplicando la concentración (C) del ión por el volumen de la muestra (P):

$$D_T = C \times P$$

La estimación del indicador cuando existe información de varios eventos de lluvia, se obtiene multiplicando la concentración ponderada ($C_{\text{ponderada}}$) de una especie química, por el volumen de precipitación acumulado en una estación durante la época de lluvias (P_T):

$$D_T = C_{\text{ponderada}} \times P_T \qquad D_T = C_{\text{ponderada}} \times \sum_{i=1}^N P_i$$

¹⁶ El aerosol es un sistema coloidal obtenido por dispersión de partículas ultramicroscópicas sólidas o líquidas en el seno de un gas.

¹⁷ El término precipitación se utiliza para referirse a la caída de hidrometeoros que alcanzan la superficie de la Tierra. Los hidrometeoros están constituidos por partículas de agua (líquida o sólida) en caída o suspensión en la atmósfera, como es el caso de la lluvia, llovizna, niebla, neblina, rocío, escarcha, granizo, nieve, etc.

donde: D_T = Depósito húmedo total de una especie química (mg/m^2)
 P_T = Precipitación acumulada durante la época de lluvias (m)
 N = Número de muestras colectadas en el período

➤ Flujo de masa total

El flujo de masa total (M_T) permite conocer la cantidad de cada especie química analizada en las muestras que se depositan en una región, expresada en kg/ha . Este indicador se estima sumando los depósitos promedio (D_P) de cada una de las especies químicas analizadas. La proporción ($\%_k$) de cada especie con respecto al flujo de masa total en la región, se estima dividiendo su depósito promedio entre la masa total analizada, y por cien.

$$D_P = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (D_T)_j \quad M_T = \sum_{k=1}^s (D_P)_k \quad \%_k = \frac{(D_P)_k}{M_T} \times 100$$

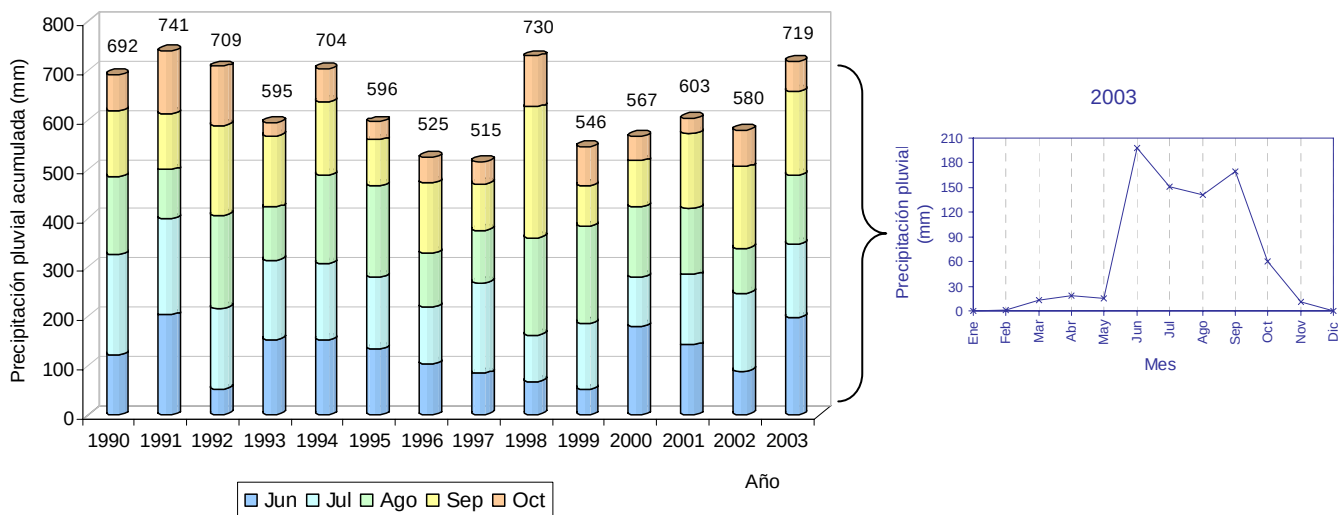
donde: D_P = Depósito húmedo promedio de una especie química en una zona (mg/m^2)
 j = j -ésima estación de monitoreo
 m = Número de estaciones de monitoreo en una zona (Con entorno semejante y ZMVM)
 M_T = Flujo de masa total (mg/m^2)
 k = k -ésima especie química (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , CO_3^{2-} , H^+ , NH_4^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+)
 s = Número de especies químicas analizadas
 $\%_k$ = Proporción de la k -ésima especie química con respecto al flujo de masa analizado

COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL

La evolución histórica y espacial de la precipitación pluvial en la ZMVM, permite inferir el comportamiento temporal y espacial de los parámetros analizados en las muestras de depósito húmedo obtenidas en la Ciudad de México.

Durante la época de lluvias de 2003 (junio a octubre) la precipitación pluvial acumulada fue de 719 mm y se puede calificar como “alta” si se compara con el volumen registrado en años anteriores. El mes que registró mayor precipitación fue junio, con 198 mm (Figura 20).

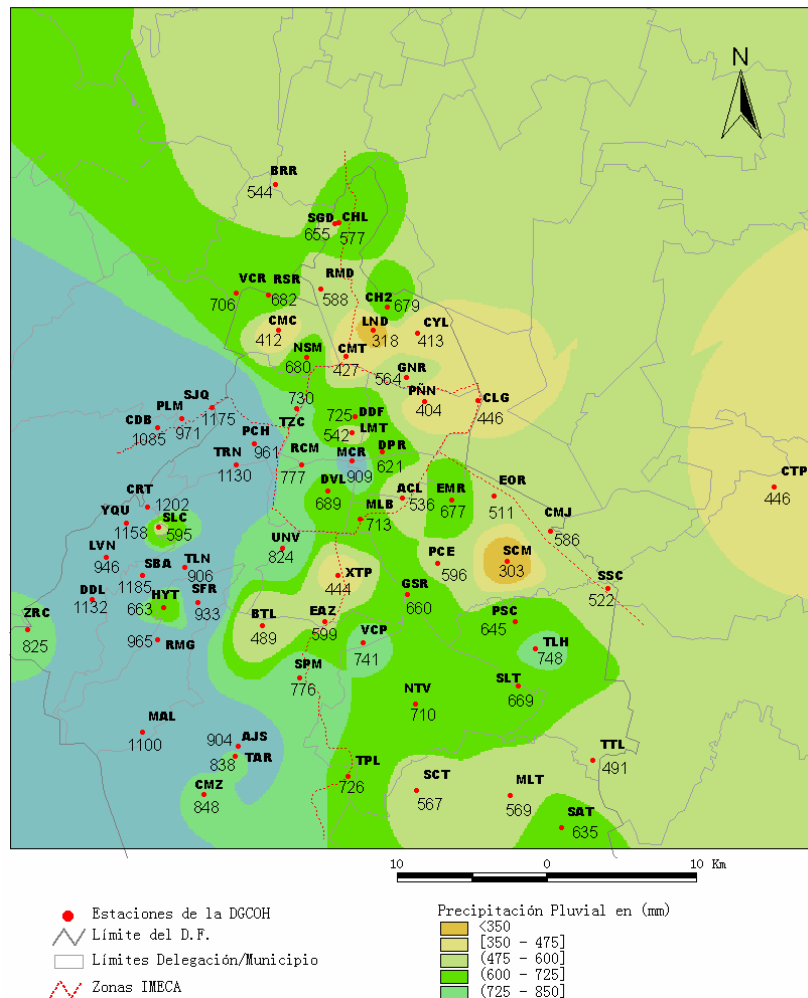
Figura 20. Precipitación pluvial captada durante la época de lluvias (junio-octubre), en la ZMVM (1990–2003).



Fuente: DGCOH

La distribución espacial del volumen de precipitación pluvial registrado en la época de lluvias de 2003, mostró los niveles máximos en la región que incluye las delegaciones Tlalpan, Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Miguel Hidalgo y los municipios Huixquilucan y Naucalpan. Los niveles menores, se localizan en la región que comprende las delegaciones Iztapalapa, Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza y el municipio Nezahualcóyotl (Mapa 6).

Mapa 6. Precipitación pluvial acumulada durante la época de lluvias de 2003, en la ZMVM.



Fuente: DGCCH

COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE IONES EN AGUA DE LLUVIA

En la REDDA se determina la concentración ponderada de algunas especies químicas de origen antropogénico (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , NH_4^+) y biogénico (CO_3^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), la conductancia específica¹⁸ (CE) y el potencial de hidrógeno¹⁹ (pH), a fin de caracterizar las precipitaciones de la época de lluvias.

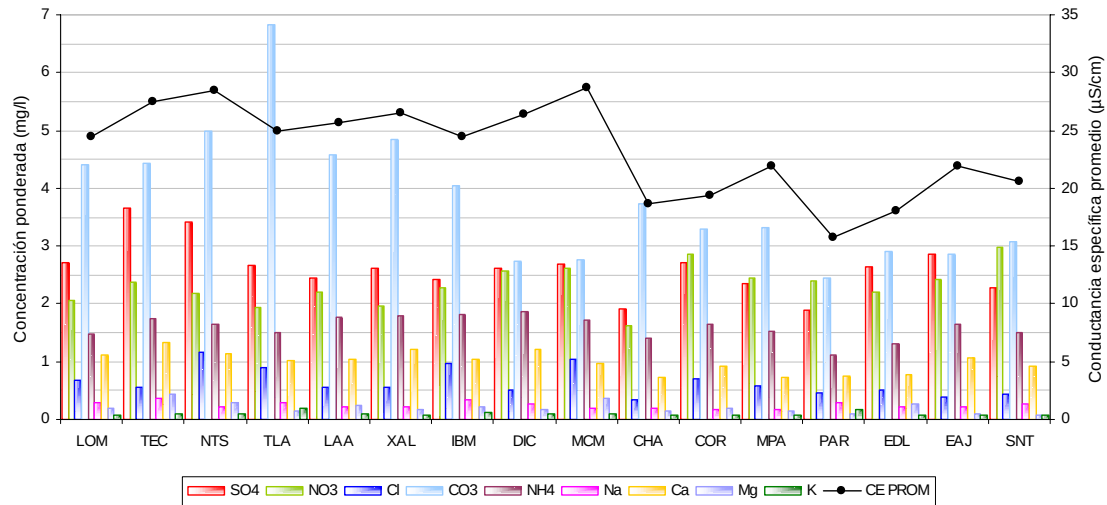
Las concentraciones ponderadas máximas de SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- , se presentan en las estaciones de monitoreo Cerro del Tepeyac (TEC), San Nicolás Totolapan (SNT) y Netzahualcóyotl Sur (NTS), con 3.7, 3.0 y 1.2 mg/l, respectivamente. La CE máxima de 2003 la registra la estación Museo de la Cd. de México (MCM) con 28.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la mínima Parres (PAR), con 15.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 21).

¹⁸ La CE o conductancia específica es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia, concentraciones relativas y de la temperatura.

¹⁹ El pH en fase acuosa se define como el logaritmo negativo de la actividad del ión hidronio (H_3O^+), es decir: $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$. El pH representa un valor característico relacionado con el nivel de acidez intrínseca de la solución analizada.

Debido a su influencia en los niveles de acidez, el ión carbonato²⁰ (CO₃⁻) se mide en la ZMVM a partir del 2003 y presenta concentraciones (Figura 21) superiores a los demás iones. La estación Tlalnepantla (TLA) registra la concentración máxima (6.8 mg/l) y PAR la mínima (2.5 mg/l).

Figura 21. Concentración ponderada de especies químicas (mg/l) y Conductancia específica (µS/cm) medidas en la ZMVM durante la época de lluvias de 2003.



Al clasificar las estaciones de monitoreo de la REDDA según su entorno (Tabla 21) y evaluar el depósito húmedo, se puede identificar a las regiones cuya actividad o medio esta siendo afectado por la lluvia ácida.

Tabla 21. Estaciones de monitoreo de la REDDA y entorno que caracterizan.

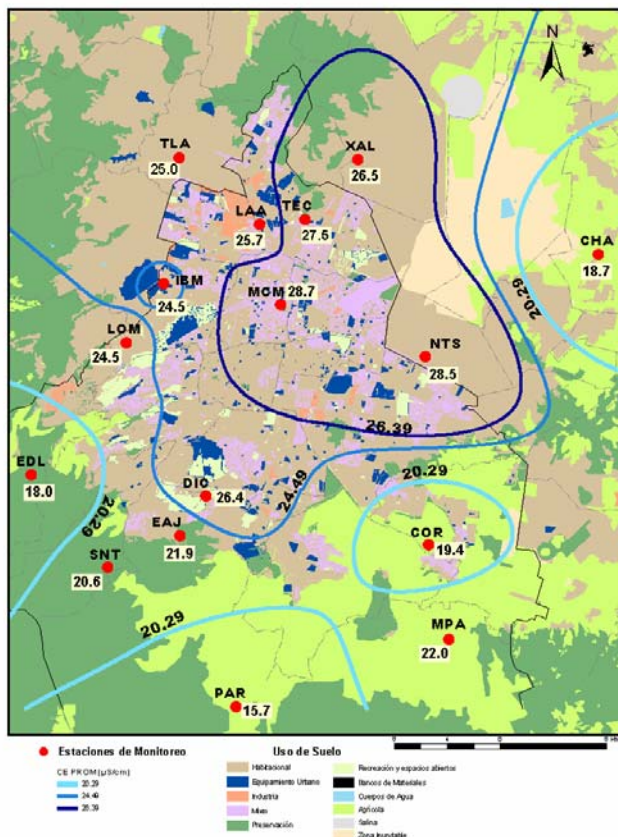
Entorno	Estación	Clave	Zona
Agrícola	Chapingo	CHA	NE
	CORENA	COR	SE
	Milpa Alta	MPA	SE
	Parres	PAR	SO
Habitacional	Cerro del Tepeyac	TEC	NE
	Netzahualcóyotl Sur	NTS	NE
	Tlalnepantla	TLA	NO
Industrial	Lomas	LOM	SO
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	NO
Tráfico Intenso	Xalostoc	XAL	NE
	Museo de la Ciudad de México	MCM	CE
	Diconsa	DIC	SO
Forestal	Legaría	IBM	NO
	Ecoguardas Ajusco Picacho	EAJ	SO
	Exconvento Desierto de los Leones	EDL	SO
	San Nicolás Totoloapan	SNT	SO

En general, la distribución espacial de la CE (Mapa 7), indica que los valores altos de concentración ponderada se obtienen en estaciones de monitoreo con baja precipitación pluvial y agrupación de industrias, comercios, viviendas o ejes viales importantes (zona noreste); mientras que, las concentraciones bajas son comunes en estaciones que registran precipitación alta y presentan entorno forestal o agrícola (zona suroeste).

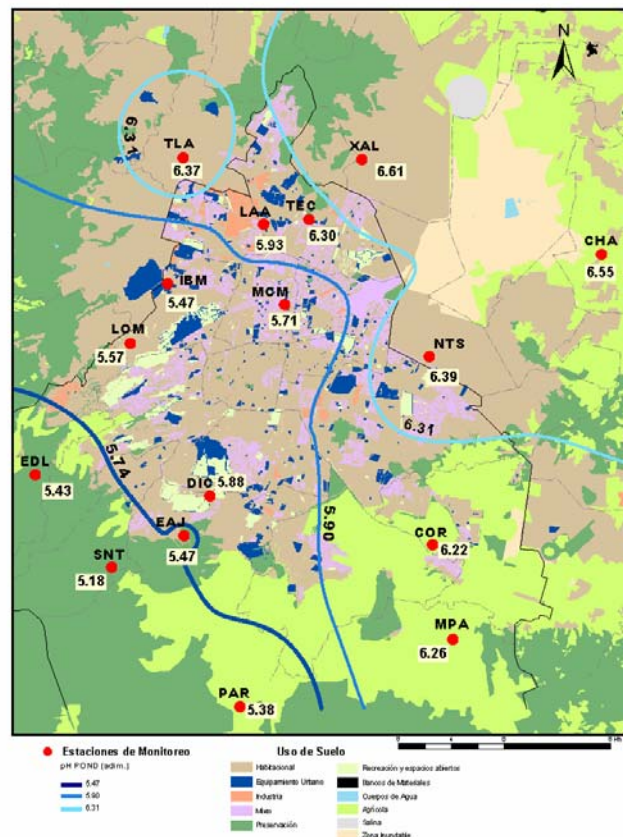
Por su parte, la distribución espacial de pH (Mapa 8) indica en general, que los niveles altos de acidez se registran en estaciones de monitoreo con entorno forestal y precipitación alta (zona suroeste), y los niveles bajos, en estaciones con entorno urbano y precipitación baja (zona noreste). El pH ponderado de menor magnitud en la ZMVM lo presenta la estación SNT y es de 5.18.

²⁰ El carbonato es un anión de origen natural, principalmente geológico, que normalmente se asocia con los cationes Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺, y usualmente origina la alcalinidad del agua.

Mapa 7. Distribución espacial de la CE promedio ($\mu\text{S}/\text{cm}$) durante la época de lluvias de 2003, en la ZMVM.



Mapa 8. Distribución espacial del pH ponderado durante la época de lluvias de 2003, en la ZMVM.

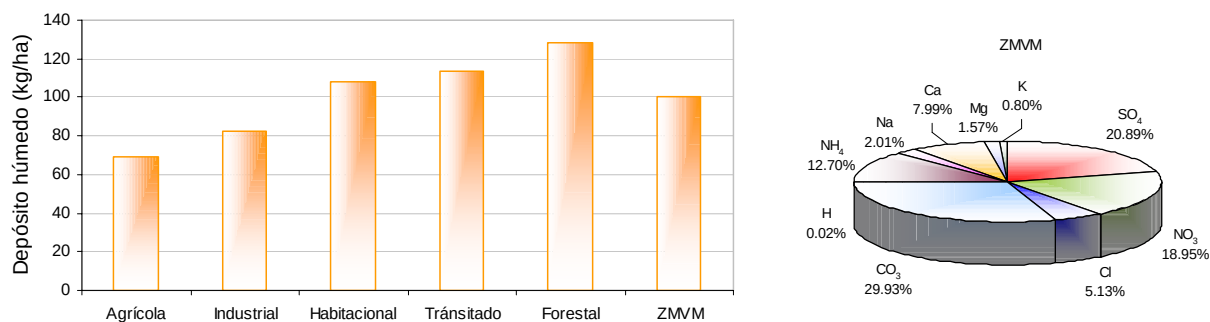


COMPORTAMIENTO ESPACIAL DEL DEPÓSITO HÚMEDO

El patrón espacial del depósito húmedo muestra valores altos en el suroeste y bajos en el este de la ZMVM. El suroeste presenta entorno forestal con alta precipitación y el este entorno mixto urbano-industrial con baja precipitación. El depósito húmedo promedio de CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y NO_3^- en la ZMVM, durante la época de lluvias de 2003, fue de 30, 21 y 19 kg/ha, respectivamente.

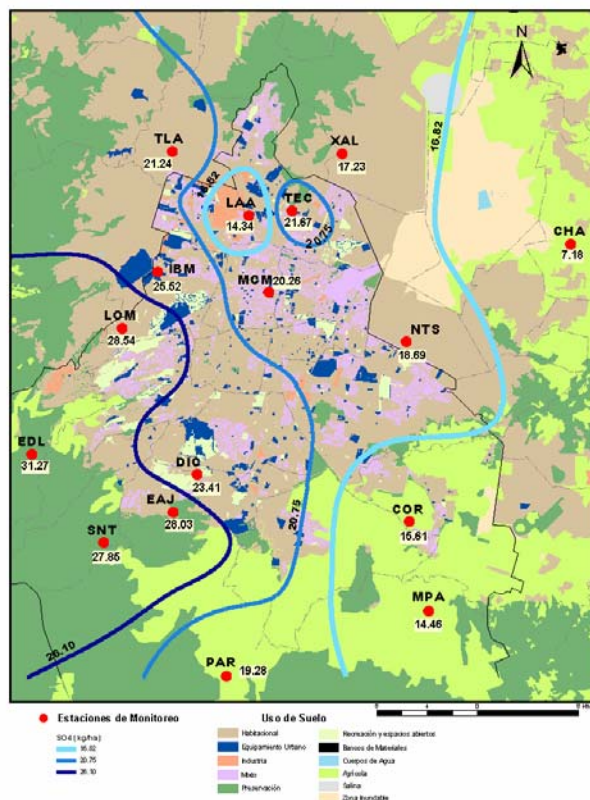
El análisis químico del depósito húmedo indica que las estaciones con entorno forestal presentan el mayor flujo de masa total (Figura 22). Al nivel de la ZMVM, el flujo de masa total obtenido con los iones analizados, muestra una mayor proporción de CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y NO_3^- (Figura 22).

Figura 22. Flujo de masa total (kg/ha) en la ZMVM y su proporción (%), época de lluvias de 2003.

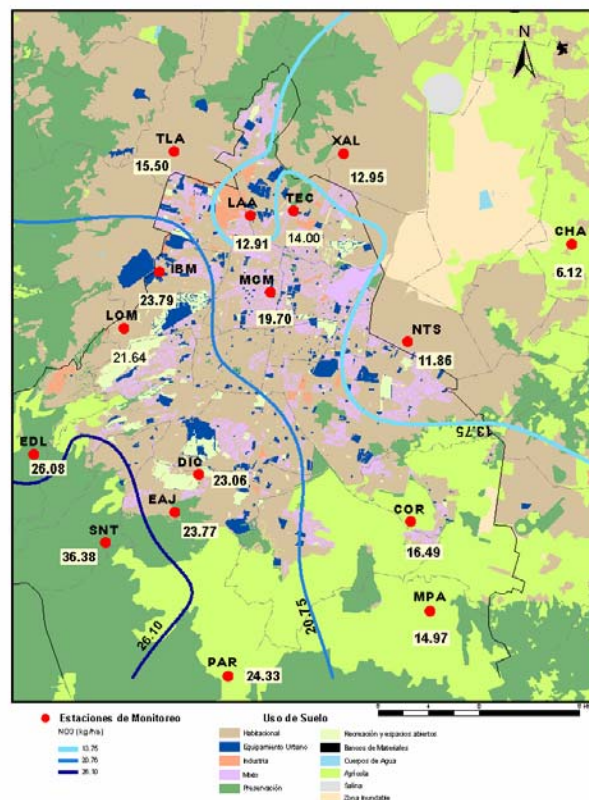


El mayor aporte de depósito húmedo en áreas de preservación forestal, se observa en la distribución espacial de SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- (Mapas 9, 10 y 11), que exhiben valores máximos en el suroeste y noroeste de la ZMVM. Estos compuestos están asociados a los principales precursores de acidez (SO_2 , NO_x y Cl) y sus patrones de distribución coinciden con el de pH (Mapa 8). El comportamiento espacial de los CO_3^{2-} (Mapa 12) indica niveles altos en la zona noroeste.

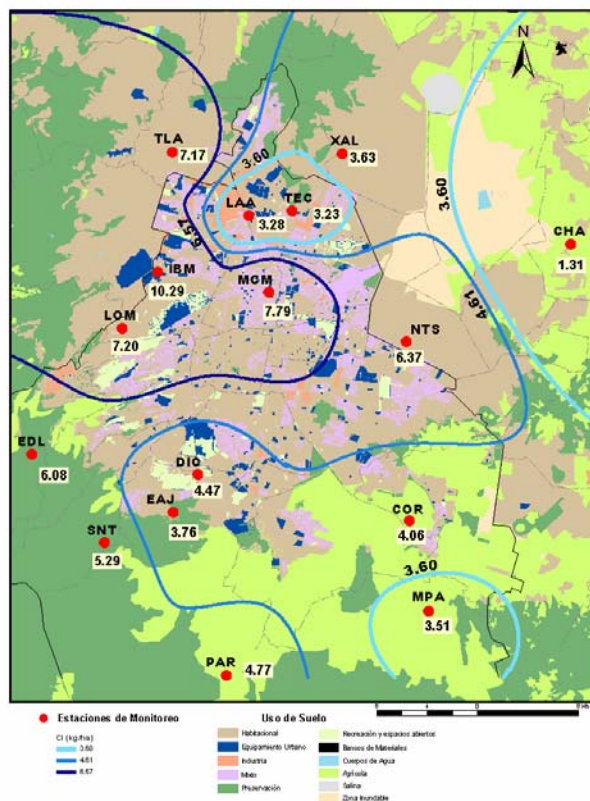
Mapa 9. Distribución espacial del depósito húmedo de SO_4^{2-} (kg/ha) en la ZMVM, durante la época de lluvias de 2003.



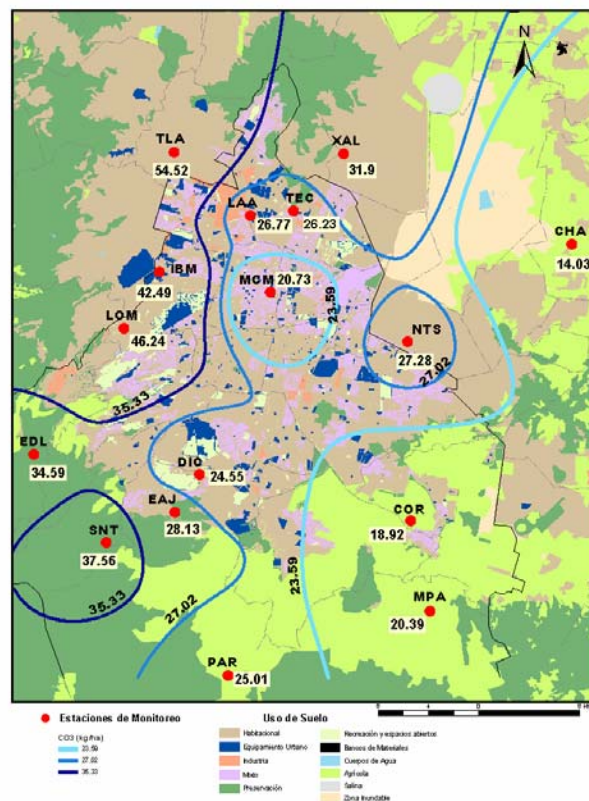
Mapa 10. Distribución espacial del depósito húmedo de NO_3^- (kg/ha) en la ZMVM, durante la época de lluvias de 2003.



Mapa 11. Distribución espacial del depósito húmedo de Cl^- (kg/ha) en la ZMVM, durante la época de lluvias de 2003.



Mapa 12. Distribución espacial del depósito húmedo de CO_3^{2-} (kg/ha) en la ZMVM, durante la época de lluvias de 2003.



BIBLIOGRAFÍA

- CAM (GDF, SEMARNAT, SSA, GEM). 2002. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002–2010*.
- CAM (SEMARNAT, DDF, SMA, GEM). 1996. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995–2000*.
- DDF. 1990. *Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica*. Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México.
- Diccionario Enciclopédico 2001. *El Pequeño Larousse Ilustrado*. Ed Larousse.
- Real Academia Española. 2001. *Diccionario de la Lengua Española*. 22ª ed. Ed. Espasa Calpe. España.
- ECOURS. 2001. *Ecosistema urbano y salud de los habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México*. Ed. Acuario. México, D.F.
- GDF. 2002. *Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2001 para la Zona Metropolitana del Valle de México*. Secretaría del Medio Ambiente. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire.
- GDF. 2003. *Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2002 para la Zona Metropolitana del Valle de México*. Secretaría del Medio Ambiente. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire.
- Gilbert O.R. 1987. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Ed. Van Nostrand Reinhold. Pp. 204–329
- DIME. 2003. *Inventario de Emisiones a la Atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de México (2000)*. Secretaría del Medio Ambiente del GDF. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Dirección de Inventario y Modelación de Emisiones.
- Ramos V., R. 2003. *Diseño e instalación de la red de partículas finas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Boletín del Programa Integral sobre Contaminación del Aire Urbana, Regional y Global. Ejemplar Núm. 4. México, D.F.
- Rivera H., O y Retama H., A. 2003. *La Red de Monitoreo de PM_{2.5} de la Ciudad de México*. Boletín de la Red de Desarrollo e Investigación sobre Calidad del Aire en Grandes Ciudades. Año III. Boletín Núm. 4. México, D.F.
- Vet, Robert J. 1991. *Wet Deposition: Measurement Techniques*. The Handbook of Environmental Chemistry Volumen 2 Parte F Reactions and Processes. Ed. Springer–Verlag Alemania.