

## **DIRECTORIO**

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

**DRA. CLAUDIA SHEINBAUM PARDO**  
Secretaria del Medio Ambiente

**DR. 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  
BIÓL. MÓNICA DEL CARMEN JAIMES  
PALOMERA  
ING. GERARDO SAMUEL LÓPEZ  
VENEGAS  
TÉC. MARÍA GUADALUPE GRANADOS  
GUTIÉRREZ

### **COLABORACIÓN**

GEÓG. VICENTE PÉREZ NUÑEZ  
TÉC. ARMANDO RETAMA HERNÁNDEZ  
ING. ALEJANDRO CAMPOS DÍAZ  
MET. ALFREDO ALFONSO SOLER

### **DISEÑO DE PORTADA**

D.G. JOSÉ ANTONIO VALDÉZ  
TORIZ

### **AGRADECIMIENTOS**

DIRECCIÓN GENERAL DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN HIDRÁULICA (DGCOH)

PETRÓLEOS MEXICANOS (PEMEX)

## **PRESENTACIÓN**

La gestión ambiental del aire en la Ciudad de México requiere acciones que garanticen la continuidad de la medición de contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos, en apego a los estándares que dictan las normas técnicas ecológicas mexicanas y las agencias de protección al ambiente. Al mismo tiempo se moderniza la infraestructura para mejorar la captura, administración y difusión de la información ambiental, dado que es necesario satisfacer el derecho público a la información y es la mejor herramienta para motivar la corresponsabilidad de la población en la mejora de la calidad del aire.

Actualmente el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), integra los esfuerzos realizados en el pasado para la medición de contaminantes y parámetros meteorológicos, al mismo tiempo desarrolla acciones tendientes a transparentar los procedimientos involucrados en el mantenimiento y operación de sus equipos, la vigilancia, adquisición y difusión de la información. Paralelamente evalúa la representatividad de las mediciones en su configuración actual, la conveniencia de reubicar estaciones de monitoreo y modificar su cobertura debido a la expansión de la mancha urbana.

La instrumentación de nuevas tecnologías para medir contaminantes y transmitir la información, la medición de partículas menores a 2.5 micrómetros e hidrocarburos, así como el desarrollo de medios electrónicos para difundir información, son parte de las acciones que el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, desarrolla para ofrecer un mejor servicio a la población.

La creación del Consejo Asesor en febrero de 2002, permite sustentar y orientar la operación y desarrollo del Sistema de Monitoreo Atmosférico. Actualmente participan 11 reconocidos especialistas en gestión ambiental, monitoreo de la calidad del aire y efectos en la salud.

Estas medidas son parte del Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002–2010 y son la base fundamental para garantizar la calidad de la información. El programa señala la necesidad de conformar indicadores para evaluar el desempeño de los programas y acciones de prevención y control.

En razón de lo anterior, me es grato presentar el “Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias para la Zona Metropolitana del Valle de México - 2002”, un documento que actualiza la información sobre contaminación atmosférica a través de indicadores de estado y tendencias de la calidad del aire. Al mismo tiempo aporta información del trabajo presente y futuro del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México.

Claudia Sheinbaum Pardo

Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	IV
RESUMEN EJECUTIVO	V
CAPÍTULO 1. EL SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO	1
CAPÍTULO 2. INDICADORES DE ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y ANÁLISIS DE TENDENCIA	5
Criterios en la adquisición de datos	5
Criterios para obtener indicadores	5
Técnicas para el análisis de tendencia	6
CAPÍTULO 3. COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	7
Indicadores	8
Ozono	9
Óxidos de nitrógeno	9
Partículas suspendidas	10
Plomo en partículas	10
Monóxido de carbono	11
Dióxido de azufre	11
CAPÍTULO 4. ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y SALUD PÚBLICA	13
Indicadores	14
Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental	14
Promedio superior al límite permisible de Ozono y PM10	14
Ozono	16
Partículas menores a 10 micrómetros	18
Partículas suspendidas totales y plomo	20
Dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono	20
CAPÍTULO 5. DEPÓSITO ATMOSFÉRICO	23
Depósito húmedo	23
Comportamiento de la precipitación pluvial en la época de lluvias en la ZMVM	23
Comportamiento espacial de las concentraciones de iones en agua de lluvia	25
Comportamiento espacial del depósito húmedo	26
BIBLIOGRAFÍA	29

## INTRODUCCIÓN

El Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias del Valle de México - 2002, 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 Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002 – 2010 (Proaire, 2002–2010).

El empleo de criterios técnicos garantiza la consistencia y confiabilidad de estos indicadores de calidad del aire, los cuales se actualizan periódicamente y son accesibles a la población. Estos indicadores de calidad del aire proporcionan un panorama integral del problema 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.

El Capítulo 1 de este documento describe la estructura actual del SIMAT y las actividades que desarrolla para garantizar la calidad de la información que provee, los mecanismos de difusión y la modernización de su infraestructura, así como los trabajos que realiza para la medición futura de partículas menores a 2.5 micrómetros e hidrocarburos.

En el Capítulo 2 se describen los indicadores de calidad del Aire del SIMAT, los conceptos y criterios técnicos que garantizan su confiabilidad y consistencia. Al mismo tiempo se presentan las herramientas estadísticas usadas para determinar la presencia de tendencia de las variables ambientales.

El Capítulo 3 integra el análisis de la evolución de los contaminantes atmosféricos entre 1990 y 2002, definiendo la presencia de tendencia y el porcentaje de cambio en este período, como una medida indirecta del efecto de las acciones de prevención y control instrumentadas. El uso de diferentes indicadores permite contar con un mejor panorama de la evolución 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.

La relevancia de evaluar el estado de la calidad del aire, respecto al riesgo a la salud de la población, se evalúa en el Capítulo 4 mediante indicadores vinculados a las Normas Oficiales Mexicanas de protección a la salud (NOM). En el caso del ozono (O<sub>3</sub>) y las partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), se analiza su situación considerando las épocas climáticas definidas en el mismo capítulo y se profundiza el análisis por medio de indicadores complementarios que mejoran la evaluación del riesgo a la salud.

En el Capítulo 5 se presenta el comportamiento de los componentes de la acidez en el agua de lluvia durante 2002, su posible relación con fuentes de emisión locales y los niveles de precipitación pluvial registrados en la ZMVM. El análisis espacial de compuestos del agua de lluvia y el potencial hidrógeno (pH) registrados en 2002, permite identificar de mejor manera la influencia de fuentes de emisión y el posible riesgo que tienen los sistemas naturales ante el fenómeno de lluvia ácida.

## RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del Proaire, 2002–2010 la modernización del monitoreo atmosférico es un compromiso para el fortalecimiento institucional, al mismo tiempo establece la necesidad de definir indicadores consistentes del desempeño ambiental de los programas de prevención y control de la contaminación.

Con la finalidad de cumplir con ambos compromisos, desde el 5 de diciembre del año 2000 la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, integró el SIMAT con el propósito de mejorar la vigilancia de la calidad del aire como medida de protección de la salud pública. Al mismo tiempo inició actividades de mejora continua de sus procesos, con la finalidad de mejorar la calidad, el acceso y la difusión de la información que recopila. Uno de los resultados son los indicadores de la calidad del aire que se actualizan periódicamente y constituyen una herramienta básica de la gestión ambiental del aire.

El presente documento integra el análisis de la información de calidad del aire registrada en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMVM). Los indicadores considerados permiten conocer el comportamiento y tendencia de los contaminantes entre 1990 y 2002, 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***

En los últimos años las concentraciones altas de ozono ( $O_3$ ) que se registran en la ZMVM han disminuido gradualmente, el indicador (percentil 90) para este tipo de concentraciones señala que durante el período 1990 – 2002 tienen un decremento promedio del 31%. 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 de ocasiones en que se ha instrumentado el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas; sin embargo, aun se presentan concentraciones máximas que superan el límite de la norma de protección a la salud, en 1995 se rebasaba en nueve de cada diez y en 2002 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. Temporalmente, el riesgo es mayor en la época seca – caliente (marzo a mayo), dado que 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, durante 2001 y 2002 se registraron los valores mínimos de este contaminante. El indicador para concentraciones altas (percentil 90) señala un decremento promedio de 36% entre 1990 y 2002. La disminución de este contaminante propicia que no se rebase el valor límite permisible de la norma de salud.

Por su parte, los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) presentan un comportamiento irregular desde 1990, que impide detectar algún tipo de tendencia.

### ***Partículas en suspensión y plomo***

Las partículas suspendidas totales (PST) tuvieron una disminución considerable después de 1992, posteriormente tuvieron cierta estabilidad y en los años 2001 y 2002 tuvieron las concentraciones mínimas desde 1990; sin embargo, en cinco de cada diez muestreos realizados en 2002, aun rebasan 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 nueve de cada diez muestreos se supera el valor límite permisible.

La evolución de las partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) muestra un patrón irregular, no obstante en los últimos dos años tiene las concentraciones mínimas desde 1990. En ambos años el valor límite de la norma se rebasó en uno de cada diez muestreos, principalmente en la época seca-caliente y seca-fría, las cuales representan un mayor riesgo por estos contaminantes. La zona de la ZMVM con niveles altos continua siendo la noreste.

En contraste con ambos tipos de partículas, el comportamiento del plomo (Pb) contenido en PM<sub>10</sub> y PST muestra una tendencia decreciente desde 1990, con una disminución mayor al 90% tanto en concentraciones altas –percentil 90– como en concentraciones típicas –percentil 50–. Igualmente se aprecia que desde 1993, el Pb en la calidad del aire no representa mayor riesgo para la salud, al no rebasar el valor límite permisible de la norma de salud para este tipo de partículas.

### ***Monóxido de carbono y dióxido de azufre***

El comportamiento de las concentraciones altas de monóxido de carbono (CO), tiene una disminución consistente desde 1990, correspondiendo al año 2002 los valores mínimos del período. Entre 1990 y 2002 la magnitud de este tipo de concentraciones disminuyó 57%. Asimismo, en los últimos dos años no se ha rebasado el valor límite permisible establecido en su Norma Oficial Mexicana de Salud.

El impacto de los eventos extraordinarios de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en los años 2000 y 2001, se refleja en el aumento que presentan la mayoría de los indicadores. La inestabilidad de su comportamiento dificulta identificar la presencia de tendencia a lo largo del período 1990-2002, tanto en las concentraciones típicas (evaluadas mediante el percentil 50), como en las concentraciones altas (evaluadas mediante el percentil 90). La presencia de eventos extraordinarios en los años 2000 y 2001, influyó para que en esos años se sobrepasara la norma de protección a la salud de 24 horas y la norma anual como criterio de exposición crónica, esta última norma se rebasó en la estación de monitoreo Tlalnepantla (TLA) localizada en el Estado de México.

### ***Depósito atmosférico***

Durante los años 2001 y 2002 los valores de acidez mínimos en el agua de lluvia se presentaron en la región suroeste de la ZMVM, los valores de pH registrados oscilaron entre 4.6 y 5.0. En esta zona se registraron los valores máximos de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, los cuales son precursores de la acidez. Esta región comprende las delegaciones Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan y Coyoacán, y el municipio de Huixquilucan del Estado de México.

Por su parte, los compuestos de origen natural, como el calcio (Ca<sup>2+</sup>), presentan una mayor concentración en el agua de lluvia depositada en el norte de la ZMVM donde predominan suelos sin cubierta vegetal.

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

Al concluir el año 2000 la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, conjuntó los esfuerzos destinados a la operación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), la Red Meteorológica (REDMET), la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) y la Red de Depósito Atmosférico (REDDA), para integrar el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT). Este sistema tiene como misión vigilar y evaluar el estado de la calidad del aire de la Ciudad de México, para informar de manera continua, permanente y oportuna a sus habitantes, con el propósito de proteger su salud y satisfacer su derecho a la información ambiental.

El número de estaciones remotas y parámetros medidos en cada una de las redes que componen el SIMAT, ha presentado cambios a lo largo del tiempo. La configuración actual del SIMAT se muestra en el Mapa 1 y los parámetros que se registran en cada una de las redes se presentan en la Tabla 1. En la actualidad es posible conocer a detalle las características de cada estación de monitoreo, como son: dirección física, coordenadas geográficas, parámetros que registra, características del entorno, etc.

**Tabla 1.** Parámetros que registra el SIMAT, 2002.

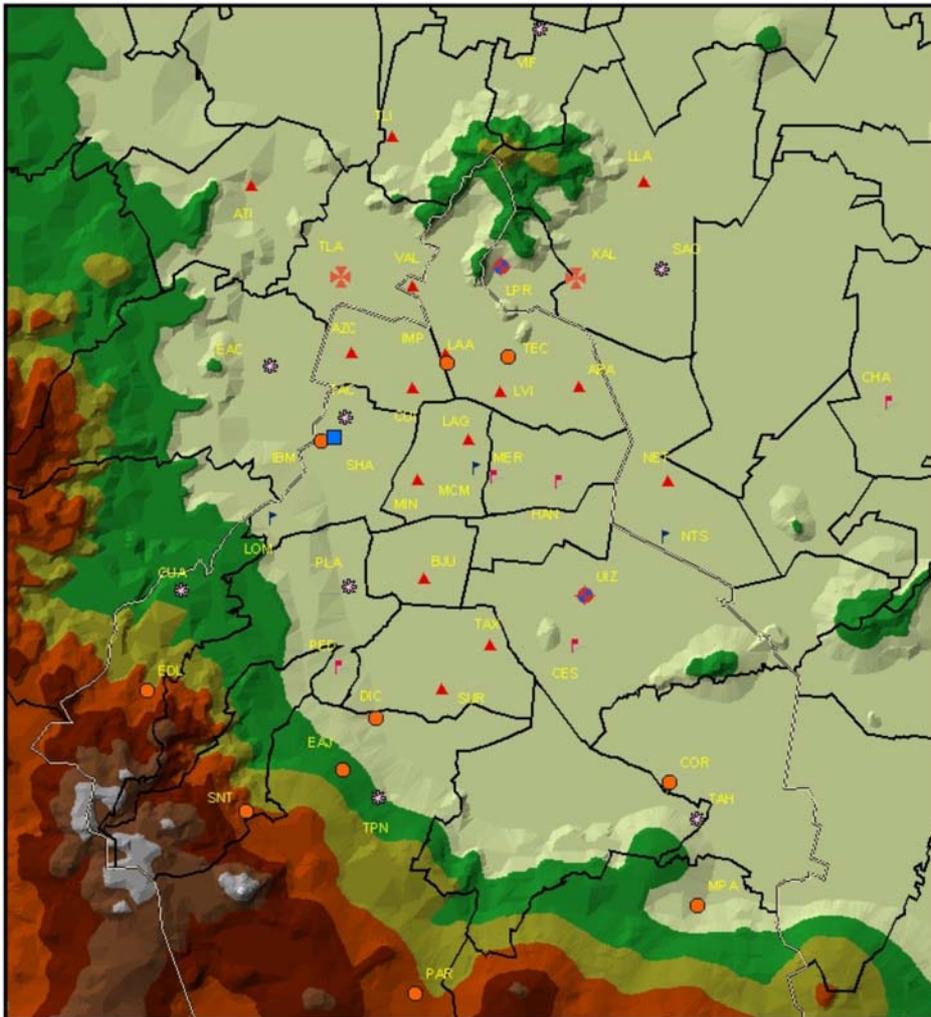
RED	ESTACIONES	PARÁMETRO
RAMA	32	Concentraciones horarias de NO <sub>x</sub> , NO y los contaminantes criterio: O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y PM <sub>10</sub> .
REDMET	15	Registros horarios de las variables meteorológicas, velocidad del viento (VV), dirección del viento (DV), humedad relativa (HR), temperatura ambiente (TMP), radiación solar UV-b (UVb) y radiación solar UV-a (UVa).
REDMA	19	Concentraciones de PST y PM <sub>10</sub> en muestreos de 24 horas cada 6 días, así como la concentración de algunos metales pesados, entre ellos el Pb.
REDDA	16	Muestreos cuatrimestrales de depósito seco y semanales de depósito húmedo (agua de lluvia); en este último se miden pH, conductividad específica, y concentraciones de aniones (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> y Cl <sup>-</sup> ) y cationes (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> y K <sup>+</sup> ).

Cabe mencionar que el SIMAT lleva a cabo mediciones de PM<sub>10</sub> por medio de equipos automáticos en la RAMA y equipos manuales en la REDMA; sin embargo, debido a que no existe una norma técnica que establezca el método de medición y procedimientos para calibrar los equipos automáticos de medición, se adoptan las técnicas y métodos de la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (US EPA, por sus siglas en inglés).

La información disponible de la REDMA con equipos de *Alto Volumen* (HI-VOL por sus siglas en inglés) data de 1986. Por su parte, la RAMA inició la medición de PM<sub>10</sub> desde 1995 con los métodos *TEOM* y *BETA*<sup>1</sup>. Las diferencias encontradas en los registros que reportaban ambos equipos en años pasados, motivó a que el SIMAT iniciara un programa de aseguramiento y control de la calidad en la operación para equiparar las mediciones de estos equipos. Debido a que los equipos de Alto Volumen son un método de referencia de la US EPA y su uso disminuye la posibilidad de errores en la medición, los indicadores de PM<sub>10</sub> que se emplean en este informe se construyen con la información proveniente de estos. En la página electrónica del SIMAT se encuentra un apartado con la información técnica y los resultados del análisis comparativo.

<sup>1</sup> El equipo *Tapered Element Oscillating Microbalance* (TEOM por sus siglas en inglés), determina continuamente la masa de las partículas recolectadas en un filtro oscilante, mediante el cambio de frecuencia de oscilación debida al depósito de partículas. El equipo BETA determina continuamente la concentración de partículas depositadas en un filtro, por medio de la absorción de un haz de radiación beta. Por su parte, los muestreadores de alto volumen muestrean un flujo de aire de aproximadamente 1.5 m<sup>3</sup>/min (unos 2000 m<sup>3</sup>/día), a fin de obtener sobre un filtro una muestra de partículas suficiente para pesarse con precisión y efectuar análisis gravimétrico y químico.

Mapa 1. Localización de las estaciones del SIMAT de la Ciudad de México (2002).



Secretaría del Medio Ambiente  
Gobierno del Distrito Federal

SIMBOLOGÍA	
▲	RAMA
◆	RAMA, REDMA
■	RAMA, REDMA, REDMET
✱	RAMA, REDMET
✠	RAMA, REDMA, REDDA, REDMET
●	REDDA
■	REDMA
▴	REDMA, REDDA

Zona	Estación	Clave
NOROESTE	Vallejo	VAL
	Tacuba	TAC
	Enep Acatlán	EAC
	Azcapotzalco	AZC
	Tlalnepantla	TLA
	Inst. Mex. del Petróleo	IMP
	Tultitlán	TLI
	Atizapán	ATI
	Legaria	IBM
Lab. de Análisis Ambiental	LAA	
Secretaría del Hacienda	SHA	

Zona	Estación	Clave
CENTRO	Lagunilla	LAG
	Merced	MER
	Hangares	HAN
	Benito Juárez	BJU
	Insurgentes	MIN
	Museo de la Cd. Méx.	MCM

Zona	Estación	Clave
SUROESTE	Santa Ursula	SUR
	Pedregal	PED
	Plateros	PLA
	Cuajimalpa	CUA
	Tlalpan	TPN
	Lomas	LOM
	Diconsa	DIC
	Ecoguardas Ajusco	EAJ
	Exconv. Desierto Leones	EDL
Parres	PAR	
San Nicolás Totolapan	SNT	

Zona	Estación	Clave
NORESTE	Los Laureles	LLA
	La Presa	LPR
	La Villa	LVI
	San Agustín	SAG
	Xalostoc	XAL
	Aragón	ARA
	Netzahualcoyotl	NET
	Villa de las Flores	VIF
	Chapingo	CHA
	Netzahualcoyotl Sur	NTS
	Cerro del Tepeyac	TEC

Zona	Estación	Clave
SURESTE	Cerro de la Estrella	CES
	UAM Iztapalapa	UIZ
	Taxqueña	TAX
	Tláhuac	TAH
	CORENA	COR
	Milpa Alta	MPA

Entre las actividades de mejora continua del SIMAT se encuentran las siguientes:

**Rediseño del SIMAT.** Debido a que la mayoría de las redes del SIMAT fueron diseñadas hace 20 años, bajo el principio de vigilar la calidad del aire en zonas específicas, es importante considerar la influencia de factores que han provocado la pérdida de su representatividad temporal y espacial, lo que provoca redundancia en las mediciones y gastos de operación innecesarios. Entre los factores de cambio destacan la evolución de la Ciudad de México y su zona metropolitana, el entorno aledaño a las estaciones en los últimos años, el crecimiento y migración de la población, la redistribución o crecimiento de la planta industrial, la modificación o construcción de vías de comunicación, el número de servicios e industrias, las acciones de reforestación, la pavimentación de superficies y la variación en el tránsito vehicular, entre otras.

Ante esta situación, actualmente se realiza un diagnóstico de sus redes de monitoreo para sustentar el rediseño del SIMAT. El propósito es determinar el número óptimo de estaciones de monitoreo, tomando en cuenta la evaluación y clasificación física de cada estación de monitoreo, el análisis de redundancia de las mediciones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO), y el estudio de las variables más importantes que permitan la reubicación de estaciones y/o el establecimiento de nuevas estaciones.

**Establecimiento de la red de monitoreo para medición de PM<sub>2.5</sub>:** La Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, a través del SIMAT, coordina un proyecto para instalar una red de monitoreo de PM<sub>2.5</sub> con 8 estaciones, a fin de contar con información que conduzca a la prevención y control de este contaminante de gran importancia.

La planeación del proyecto inició en 1999, durante el año 2000 se realizó una extensa campaña de monitoreo en 80 puntos, posteriormente se evaluaron los sitios idóneos para establecer las estaciones de monitoreo y los equipos de monitoreo adecuados a las condiciones atmosféricas de la ZMVM. La red de PM<sub>2.5</sub> estará instalada a finales del primer semestre de 2003 e iniciará operaciones en el segundo semestre del mismo año.

**Medición de hidrocarburos mediante DOAS:** Este proyecto cuenta con la colaboración del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y contempla rehabilitar los equipos de medición remota de especies de hidrocarburos, dada la importancia de esta información en el estudio, evaluación y formulación de estrategias de control de emisiones.

Actualmente el SIMAT cuenta con tres Espectroscopios de Absorción Óptica Diferencial (DOAS por sus siglas en inglés) para la medición continua de benceno, tolueno, formaldehído, entre otros contaminantes. También cuenta con 5 instrumentos para la medición continua de hidrocarburos totales por el método de detección por ionización de flama. Para iniciar la operación de éstos instrumentos se requiere adquirir un calibrador con gases de referencia, consumibles, accesorios y estándares de calibración, así como los elementos técnicos y las herramientas para generar las bases de datos, validarlas y analizarlas. Se espera que el proyecto DOAS esté en operación en el segundo semestre de 2004.

**Plan de difusión de la información:** El plan de difusión de la información pretende mejorar el acceso a la información y los productos que genera el SIMAT. El concepto que engloba este plan, es llevar la información a los usuarios, lo cual ha requerido efectuar las siguientes acciones:

- Consolidar una agenda de usuarios de información, actualmente se cuenta con 371.
- Elaborar y enviar publicaciones a través de medios electrónicos, como es el caso de: Informe ejecutivo de calidad del aire e Informe mensual de calidad del aire.
- Elaborar y dar mantenimiento a la página electrónica del SIMAT (<http://www.sma.df.gob.mx/simat/>).
- Elaborar los contenidos sobre calidad del aire para publicaciones regulares sobre el tema.

- Impartir talleres de sensibilización en contaminación del aire y prevención, dirigido a estudiantes, profesores y público en general, el cual se imparte en las instalaciones del SIMAT, escuelas, ferias y espacios ambientales.

## CAPÍTULO 2. INDICADORES DE ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y ANÁLISIS DE TENDENCIA

La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) define un indicador como una forma de reducir el número de medidas y parámetros para tener una representación "exacta" del estado de un fenómeno y simplificar el proceso de comunicación de resultados. El Proaire 2002-2010 define a los indicadores ambientales como una representación numérica que sintetiza información en un período de tiempo, como forma directa o indirecta de medir su calidad y que pueden usarse para determinar la situación actual y las tendencias en la capacidad del ambiente para sustentar la salud ecológica y humana.

El SIMAT cuenta con indicadores de calidad del aire y meteorología para conocer oportunamente la evolución en el tiempo y en el espacio de los parámetros que registra. Estos indicadores son una herramienta que apoya la toma de decisiones al momento de evaluar la eficacia de los programas de prevención y control de la contaminación del aire. Su elaboración con elementos técnicos sencillos facilita su acceso a los diferentes sectores de la población.

Los cambios en el SIMAT debido al aumento, reducción o reubicación de estaciones e instrumentos de medición, así como la pérdida o invalidación de registros por fallas en la operación de instrumentos y transmisión de información, contaminación de filtros, interrupciones de energía eléctrica o mantenimiento de equipos, son elementos que se consideran al momento de adquirir los datos y generar indicadores.

A continuación se describen los criterios que emplea el SIMAT para garantizar la calidad de datos durante su adquisición, los criterios para procesar la información y obtener indicadores, y las pruebas estadísticas para determinar la presencia de tendencia.

### Criterios en la adquisición de datos

Desde el año 2001 el SIMAT instrumenta criterios técnicos para incrementar la calidad de la adquisición de datos y con ello la confiabilidad de los indicadores; entre los criterios destacan:

- Registro de concentraciones "cero" de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub><sup>2</sup>
- Integración de promedios horarios con un mínimo de 75% de información (45 minutos)
- Integración de concentraciones de NO<sub>x</sub> considerando una diferencia máxima de ±0.006 ppm en la suma de NO y NO<sub>2</sub>
- Homologación en las mediciones de PM<sub>10</sub> de equipos automáticos con equipos manuales

### Criterios para obtener indicadores

El criterio principal para obtener indicadores consiste en evaluar el desempeño de las estaciones de monitoreo, dado que esta característica garantiza su confiabilidad respecto del fenómeno que representan. Estos criterios se describen a continuación:

- **Desempeño anual:** La información anual que provee una estación de monitoreo es representativa para generar indicadores, si cuenta con al menos el 75% de los datos esperados. Se consideran tres tipos de desempeño anual: BUENO (75% ó más de datos esperados), REGULAR (más del 50% y menos del 75% de datos esperados) y MALO (50% ó menos de datos esperados).
- **Mejor desempeño histórico:** A lo largo de los años que una estación de monitoreo ha registrado datos, se espera que al menos en el 75% de estos haya presentado un desempeño anual BUENO, para considerarla una estación representativa de la ZMVM en análisis históricos.

---

<sup>2</sup> En años anteriores a 2001 no había garantía en la medición de concentraciones con valor cero.

- **Estaciones de monitoreo con el mejor desempeño histórico:** La relación de estaciones de monitoreo que cumplen con el mejor desempeño histórico, son las que se consideran al momento de obtener los indicadores.
- **Tipo de dato:** Los indicadores se integran con diferentes tipos de datos, de acuerdo con el fenómeno que representan y el tipo de equipo de monitoreo. En la tabla 2 se detallan el tipo de dato, los requerimientos y los parámetros, para cada tipo de equipo de monitoreo. En los capítulos posteriores se detallan las características de los indicadores, respecto del tipo de dato que integra y el fenómeno de contaminación que caracteriza.

**Tabla 2.** Tipo de datos para la obtención de indicadores.

<b>Automático</b>	<b>Promedio horario</b>	Debe contar con 75% o más de los registros de una hora (45 o más minutos).	O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, PM <sub>10</sub> y SO <sub>2</sub>
	<b>Promedio móvil</b>	Su base son promedios horarios. Debe contar con el 75% o más de los datos requeridos (6 o más datos en promedio móvil de 8 horas).	O <sub>3</sub> y CO
	<b>Máximo diario</b>	Su base son promedios horarios de un día o promedios móviles de un día. Debe contar con el 75% o más de los registros del día (18 o más horas).	O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, PM <sub>10</sub> y SO <sub>2</sub>
	<b>Promedio diario</b>	Su base son los promedios horarios de un día. Debe contar con el 75% o más de los registros del día (18 o más horas).	PM <sub>10</sub> y SO <sub>2</sub>
<b>Manual</b>	<b>Colecta de 24 horas</b>	Muestra obtenida durante 24 horas continuas, aceptable entre 20 y 26 horas, cada seis días.	PST, PM <sub>10</sub> y Pb
	<b>Colecta semanal</b>	Muestra colectada a lo largo de 7 días (± un día)	pH, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>

## TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIA

En análisis económicos la tendencia es la evolución a largo plazo de una determinada variable, permite apreciar su desplazamiento creciente o decreciente, subyacente a sus fluctuaciones cíclicas. En estadística se define como el movimiento de larga duración, continuo y lento, que representa la evolución normal de un fenómeno<sup>3</sup>. En este informe el análisis de la evolución de los contaminantes para identificar la presencia de tendencia, se realiza con los siguientes métodos.

- **Prueba de homogeneidad en las estaciones:** Debido a que los indicadores empleados en este informe se integran con información proveniente de varias estaciones de monitoreo, es necesario evaluar previamente que todas presenten un comportamiento similar, es decir, que sean homogéneas. La prueba estadística utilizada se denominada Prueba de Homogeneidad (Gilbert O. R., 1987).
- **Prueba no paramétrica para evaluar tendencia:** La presencia de tendencia se determina con la Prueba de Mann Kendall (Gilbert O. R., 1987), que identifica si una recta se ajusta al comportamiento del indicador, ya sea con pendiente negativa (tendencia decreciente), positiva (tendencia creciente) o cero (sin cambios); para esto considera los ciclos característicos del comportamiento anual del contaminante y se define en términos del porcentaje de cambio en el período analizado. Si las pruebas de homogeneidad y tendencia decreciente son afirmativas, esto indica que para un determinado indicador hay una *tendencia homogéneamente decreciente* en todas las estaciones con un nivel de confianza del 95%, es decir hay una probabilidad del 5% de que no sea correcto el resultado.

<sup>3</sup> El Pequeño Larousse Ilustrado, 2001.

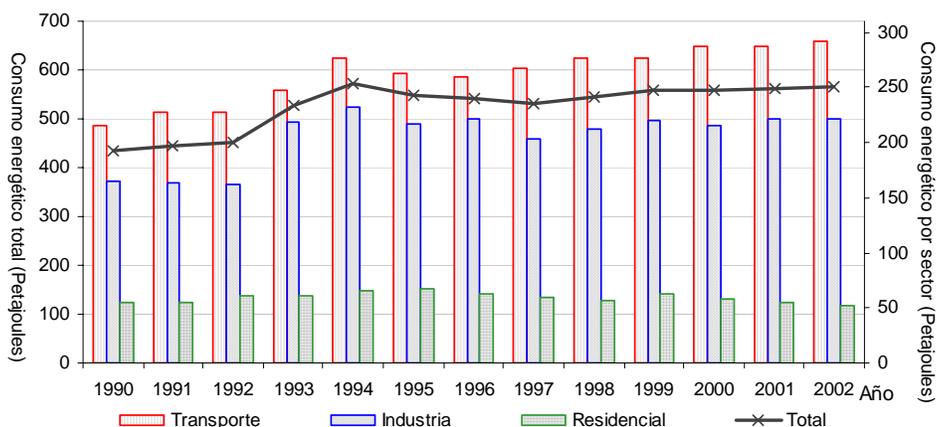
## CAPÍTULO 3. COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

El Proaire 2002 – 2010 es el instrumento de gestión ambiental del aire en la ZMVM y tiene entre sus propósitos reducir y controlar los niveles actuales de emisiones contaminantes (Molina T. and Molina J., 2002). Los precedentes a este programa fueron el Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA) y el Proaire 1995–2000. La influencia de las acciones de prevención y control de estos programas se refleja en la disminución paulatina y el control de algunos contaminantes criterio<sup>4</sup>; no obstante el O<sub>3</sub> y las partículas presentan aún niveles altos<sup>5</sup>.

Actualmente la ZMVM concentra la mayor población del país con cerca de 18.2 millones de habitantes (CAM, 2002). En los últimos años el consumo energético ha oscilado entre 550 y 600 petajoules (Figura 1), de ahí que las acciones del Proaire 2002 -2010 prevén mejorar la eficiencia de los procesos de combustión en industrias, servicios y transporte, ya que en los próximos años el crecimiento de la mancha urbana y el consumo energético que requieren las actividades económicas y sociales de esta metrópoli tendrán un aumento considerable.

En la ZMVM las fuentes móviles contribuyen con el 98, 80 y 40% de las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) e hidrocarburos totales (HC) respectivamente. Por su parte, las fuentes de área generan el 52% de los HC. La industria es responsable del 55% de las emisiones de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el 40% de las emisiones de partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) provienen de la erosión de suelo (Fuente: Inventario de Emisiones, 1998).

**Figura 1.** Distribución por tipo de combustible en la ZMVM (1990–2001).



Fuente: Datos proporcionados por PEMEX GAS Y PETROQUIMICA BÁSICA, PEMEX REFINACIÓN.  
Conversión a Petajoules: Dirección de Inventario y Modelación de Emisiones DGGAA-SMA-GDF

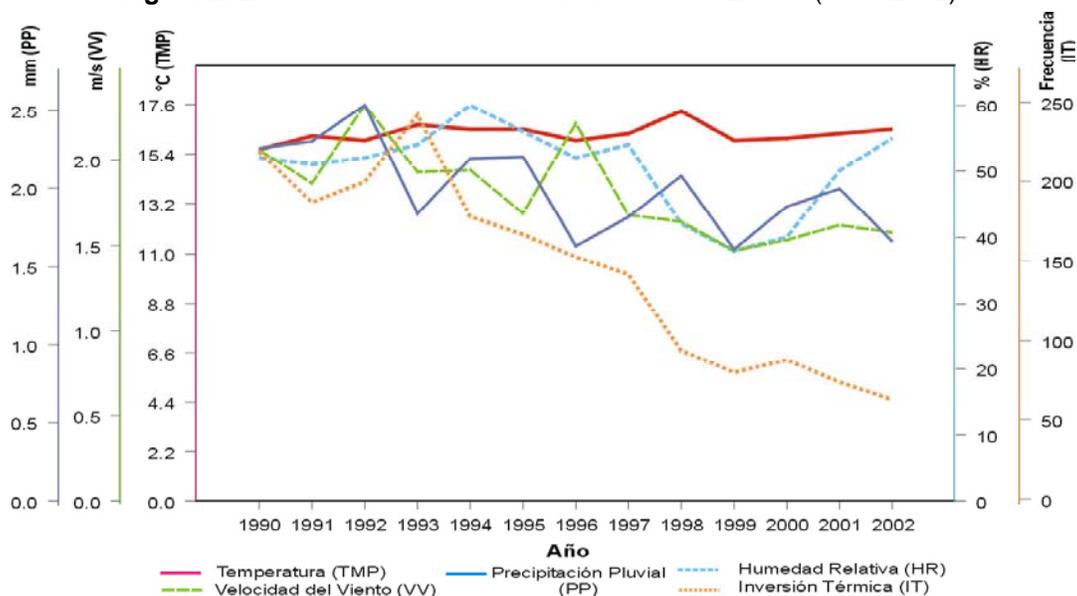
Las condiciones meteorológicas de la Ciudad de México son un factor determinante en la concentración de los contaminantes atmosféricos, de ahí que el análisis histórico de los parámetros meteorológicos que registra el SIMAT, sea necesario para evaluar su posible influencia. Entre 1990 y 2002 la humedad relativa, la temperatura ambiente y la velocidad del viento han tenido un comportamiento fluctuante. La precipitación pluvial tiene cambios anuales de consideración, destacan 1992, 1995 y 1998 como años con mayor precipitación pluvial promedio. Las inversiones térmicas han disminuido en intensidad y frecuencia en los últimos años<sup>6</sup>.

<sup>4</sup> Se denominan contaminantes criterio del aire a aquellas sustancias presentes en el aire ambiente que son abundantes, se encuentran por lo general 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 el ozono, el bióxido de azufre, el monóxido de carbono, el bióxido de nitrógeno, las partículas suspendidas totales, las partículas menores a 10 micrómetros y el plomo.

<sup>5</sup> Es importante señalar que en la ZMVM no se realizan actualmente mediciones sistemáticas de contaminantes con mayor toxicidad, como es el caso de los hidrocarburos (HC) y las partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>).

<sup>6</sup> Cabe mencionar que en términos de las inversiones térmicas, el radiosondeo que realiza el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para su medición, se llevaba a cabo en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y a partir de marzo de 1998 se cambió al Observatorio Meteorológico de Tacubaya.

**Figura 2.** Evolución de las variables climáticas en la ZMVM (1990-2002).

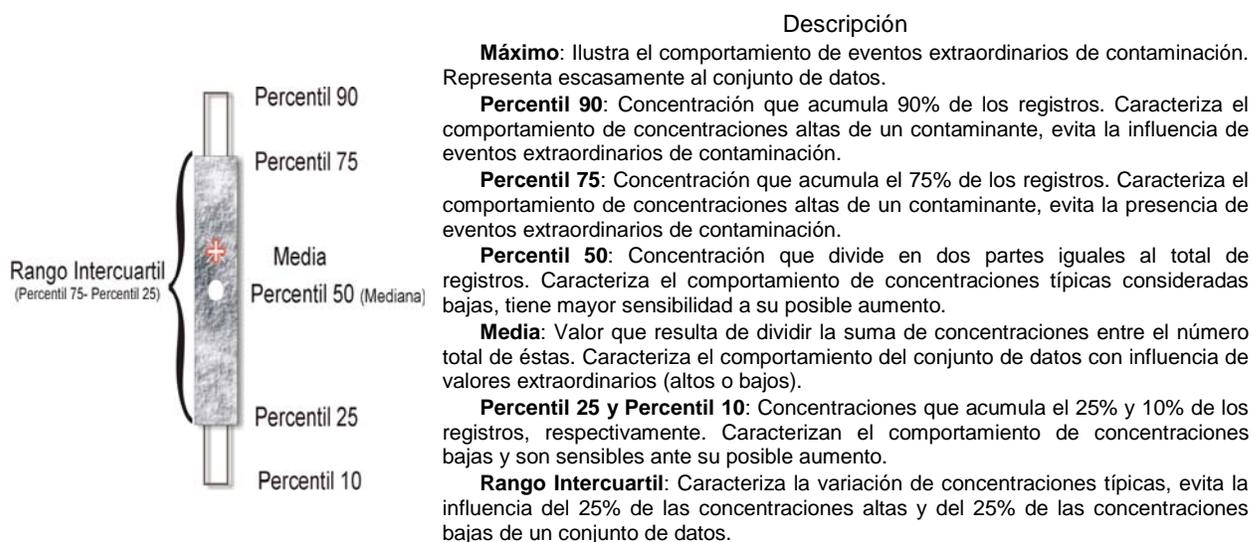


## Indicadores

La evaluación del desempeño de las acciones de prevención y control para mejorar la calidad del aire, requiere indicadores que reflejen su impacto en el comportamiento de los contaminantes, ya que dichas acciones pueden orientarse hacia la mitigación de concentraciones altas de contaminantes problema (como son O<sub>3</sub>, PST y PM<sub>10</sub>) o hacia el control de contaminantes abatidos en los últimos años (como es el caso del SO<sub>2</sub>, CO y Pb). Para cumplir con este propósito, en este capítulo se emplean los percentiles de los registros de las estaciones con mejor desempeño histórico, como indicadores para analizar la evolución de los contaminantes atmosféricos. Este enfoque es pertinente con la visión de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) en su reporte de indicadores [Advanced Air Quality Indicators and Reporting](#).

La Figura 3 representa gráficamente los percentiles asociados a un conjunto de datos y la característica de calidad del aire que representa cada uno. El análisis de tendencia y homogeneidad se aplicó a los percentiles 90, 75, 50 y a la media, dado que pueden caracterizar de mejor manera la influencia de las acciones de prevención y control de la contaminación instrumentadas en la ZMVM.

**Figura 3.** Representación gráfica de algunos indicadores estadísticos



## OZONO

La evolución de las concentraciones máximas diarias de O<sub>3</sub> en la ZMVM de 1990 a 2002, analizada con los 4 indicadores considerados (percentiles 90, 75, 50 y la Media), tiene una *tendencia homogéneamente decreciente* (Tabla 3). Esta disminución significativa en la magnitud de las concentraciones críticas y típicas se observa claramente en la Figura 4, es notable que el porcentaje de cambio de las concentraciones típicas que representa el percentil 50 sea del 33% de 1990 a 2002. Estos resultados sugieren que las acciones para reducir las emisiones de los precursores de ozono han tenido una influencia favorable.

Figura 4. Comportamiento de O<sub>3</sub> en la ZMVM, 1990–2002.

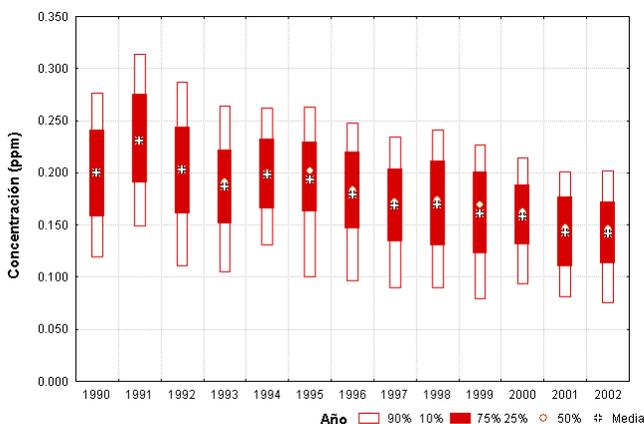


Tabla 3. Análisis de tendencia para O<sub>3</sub>.

O <sub>3</sub>	P90	P75	P50	Media
Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-31	-31	-33	-34

Cambio negativo representa decremento.

## ÓXIDOS DE NITRÓGENO

El comportamiento del O<sub>3</sub> en el apartado anterior puede explicarse en parte por el comportamiento de sus precursores, en caso del NO<sub>2</sub> el análisis de su evolución de 1990 a 2002, indica una *tendencia homogéneamente decreciente* de sus concentraciones máximas diarias, aun cuando en 2002 hay un ligero incremento (Figura 5). La tabla 4 muestra que las concentraciones críticas (percentil 90) disminuyeron un 36% de 1990 a 2002, mientras que las concentraciones típicas (percentil 50) disminuyeron 35%. No obstante lo anterior, los NO<sub>x</sub> presentan un comportamiento irregular de 1990 a 2002, lo que impide detectar la presencia de tendencia<sup>7</sup>.

Figura 5. Comportamiento de NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en la ZMVM, 1990–2002

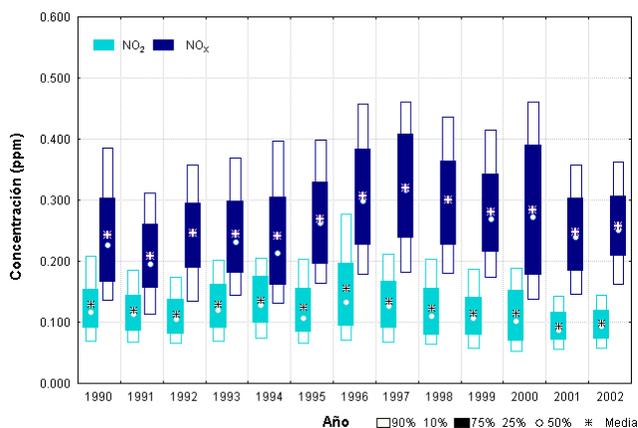


Tabla 4. Análisis de tendencia para NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>

NO <sub>2</sub>	P90	P75	P50	Media
Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-36	-33	-35	-34

NO <sub>x</sub>	P90	P75	P50	Media.
Homogeneidad	No	No	No	No
Tendencia	—	—	—	—
Porcentaje de cambio	—	—	—	—

Cambio negativo representa decremento.

<sup>7</sup> Es importante señalar que antes de 2001 no se contaba con métodos de validación para la información de NO<sub>x</sub>.

## PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

El comportamiento de las concentraciones de PST muestra una disminución considerable después de 1992, a partir de entonces su comportamiento es irregular y vuelve a presentar una disminución notable hasta 2001 y 2002 (Figura 6). El análisis de homogeneidad (Tabla 5) indica que todas las estaciones registran este tipo de comportamiento y que impide detectar la presencia de tendencia con cualquiera de los 4 indicadores. El valor del percentil 50 indica que la mitad de las concentraciones de PST registradas en 2001 y 2002, aún rebasan los 264 y 271  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente.

En el caso de las PM<sub>10</sub>, su comportamiento fluctuante entre 1990 y 2002 (Figura 6) dificulta la identificación de tendencia con cualquiera de los 4 indicadores (Tabla 5). El análisis de homogeneidad señala que este comportamiento es homogéneo en todas las estaciones para caracterizar concentraciones críticas. En 2001 y 2002 el 50% de las concentraciones registradas son inferiores a 98  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 93  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente.

Figura 6. Comportamiento de PST y PM<sub>10</sub> en la ZMVM, 1990-2002.

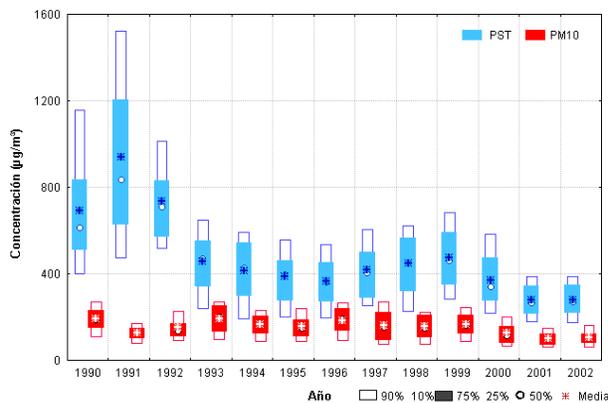


Tabla 5. Análisis de tendencia para PST y PM<sub>10</sub>.

PST	P90	P75	P50	Media
Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	No	No	No	No
Porcentaje de cambio	—	—	—	—

PM <sub>10</sub>	P90	P75	P50	Media
Homogeneidad	Si	Si	No	No
Tendencia	No	No	—	—
Porcentaje de cambio	—	—	—	—

## PLOMO EN PARTÍCULAS

El comportamiento del Pb contenido en PST y PM<sub>10</sub> tiene una *tendencia homogéneamente decreciente* en el análisis de 1990 a 2002, en este período el cambio del valor de los 4 indicadores supera el 90% (Tabla 6). El análisis de homogeneidad muestra que este comportamiento ocurre en todas las estaciones. Es importante resaltar que la mayor disminución de Pb se presenta entre 1990 y 1996, y que las concentraciones registradas en los años siguientes indican que ha permanecido bajo control (Figura 7 y Tabla 6). Esto indica la pertinencia de las acciones llevadas a cabo para su disminución y control, como fue su eliminación paulatina de la gasolina.

Figura 7. Comportamiento del Pb contenido en partículas, ZMVM 1990-2002.

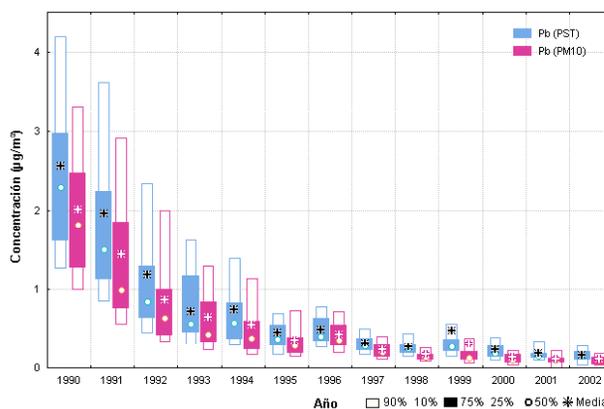


Tabla 6. Análisis de tendencia para Pb contenido en partículas.

Pb (PST)	P90	P75	P50	Media
Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-94	-94	-95	-94

Pb (PM <sub>10</sub> )	P90	P75	P50	Media
Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-95	-95	-96	-95

Cambio negativo representa decremento.

## MONÓXIDO DE CARBONO

El comportamiento de los registros horarios del CO con los 4 indicadores, indica una disminución consistente entre 1990 y 1994, posteriormente hay cierta estabilidad y en los dos últimos años disminuyen nuevamente; destaca el año 2002 con las concentraciones mínimas (Figura 8). Este comportamiento refleja el resultado de las acciones para reducir emisiones de este contaminante.

El análisis de las concentraciones altas de CO por medio del Percentil 90 y 75, señala que tienen una *tendencia homogéneamente decreciente* de 1990 a 2002; sin embargo, el mayor decremento se presenta en las concentraciones típicas, representadas con el Percentil 50, con 70% (Tabla 7). El análisis particular del período 1995 – 2002 indica que a pesar de la estabilidad mencionada antes, hay una *tendencia homogéneamente decreciente* de las concentraciones altas y típicas, estas últimas con el mayor cambio porcentual en su valor (47%).

Figura 8. Comportamiento del CO horario en la ZMVM, 1990-2002.

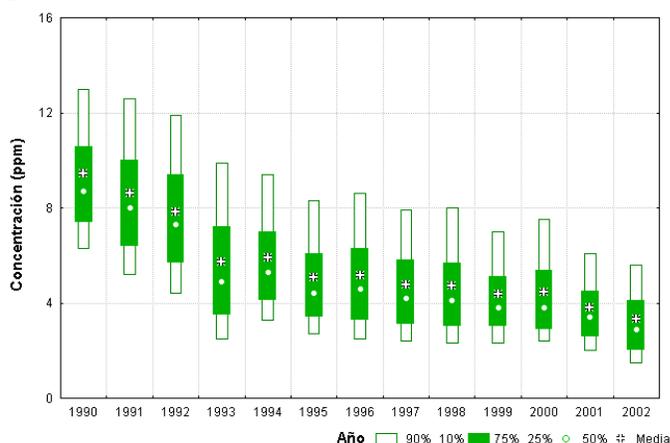


Tabla 7. Análisis de tendencia para CO.

CO (1990-2002)	P90	P75	P50	Media
Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-57	-64	-70	-65

CO (1995-2002)	P90	P75	P50	Media
Homogeneidad	Si	Si	Si	Si
Tendencia	Si	Si	Si	Si
Porcentaje de cambio	-38	-40	-47	-43

Cambio negativo representa decremento.

## DIÓXIDO DE AZUFRE

El comportamiento de los registros horarios de SO<sub>2</sub> indica un aumento en 2000 y 2001, principalmente en las concentraciones altas, mientras que en 2002 hay una disminución considerable en las concentraciones típicas (Figura 9). La ausencia de homogeneidad en el análisis de tendencia del período 1990 – 2002, indica que el comportamiento descrito anteriormente no ocurre en todas las estaciones de monitoreo; sin embargo, influye en la definición de tendencia (Tabla 8). El análisis del período 1993 - 2002 muestra una *tendencia homogéneamente decreciente* de las concentraciones típicas (percentil 50), la ausencia de tendencia y homogeneidad con indicadores de concentraciones altas indica que éstas se registran solamente en algunas estaciones.

Figura 9. Comportamiento del SO<sub>2</sub> horario en la ZMVM, 1990-2002.

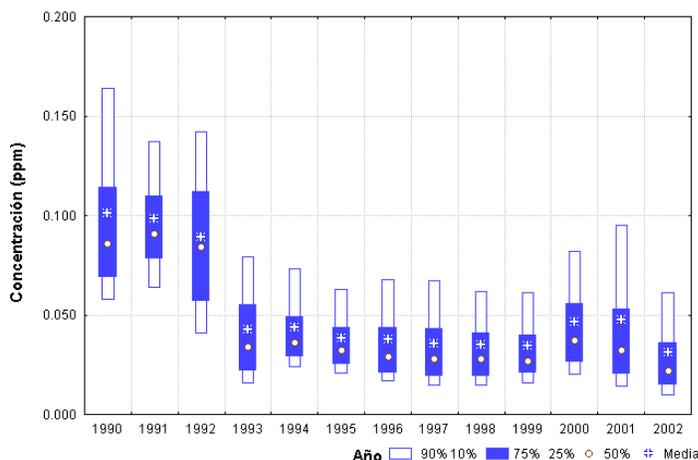


Tabla 8. Análisis de tendencia para SO<sub>2</sub>.

SO <sub>2</sub> (1990-2002)	P90	P75	P50	Media
Homogeneidad	No	No	No	No
Tendencia	—	—	—	—
Porcentaje de cambio	—	—	—	—

SO <sub>2</sub> (1993-2002)	P90	P75	P50	Media
Homogeneidad	No	No	Si	Si
Tendencia	—	—	Si	Si
Porcentaje de cambio	—	—	-41	-27

Cambio negativo representa decremento.

La presencia de concentraciones altas de SO<sub>2</sub> en alguna estaciones de monitoreo, se corrobora con los resultados del Sistema de Avisos de Casos Extraordinarios de Contaminación que mantiene el SIMAT. Este sistema se activa cuando se registra una concentración horaria de SO<sub>2</sub> que supera las 0.200 ppm y su finalidad es informar a las autoridades pertinentes para que lleven a cabo acciones de supervisión y vigilancia de las posibles fuentes emisoras involucradas.

En la Tabla 9 se lista el número de ocasiones en que se reportó este aviso en 2000, 2001 y 2002, el 80% de estos casos corresponden a las estaciones de monitoreo Tlalnepantla (TLA) y La Presa (LPR) localizadas en el municipio de Tlalnepantla; Xalostoc (XAL), Los Laureles (LLA) y San Agustín (SAG) localizadas en el municipio de Ecatepec; y la estación Tultitlán, localizada en el municipio del mismo nombre.

**Tabla 9.** Eventos extraordinarios de SO<sub>2</sub> registrados en la ZMVM (2000–2002), concentración horaria en ppm.

Año	Estación	Zona	# eventos	Mínimo	Máximo	Año	Estación	Zona	# eventos	Mínimo	Máximo
2000	TLA	NO	2	0.208	0.400	2002	TLI	NO	8	0.386	0.202
	XAL	NE	1	0.131	0.131		TLA	NO	2	0.229	0.228
2001	TLA	NO	27	0.204	0.499		EAC	NE	2	0.224	0.21
	XAL	NE	2	0.233	0.241		XAL	NE	2	0.286	0.268
	ATI	NO	2	0.270	0.373		ATI	NO	2	0.291	0.218
	EAC	NO	3	0.240	0.481		SAG	NO	2	0.323	0.224
	TLI	NO	2	0.278	0.386		LLA	NE	2	0.375	0.207
	LPR	NE	2	0.273	0.273		PLA	SO	1	0.202	0.202
	LLA	NE	2	0.305	0.424		LVI	SE	1	0.263	0.263
	AZC	NO	1	0.289	0.289						

## CAPÍTULO 4. ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y SALUD PÚBLICA

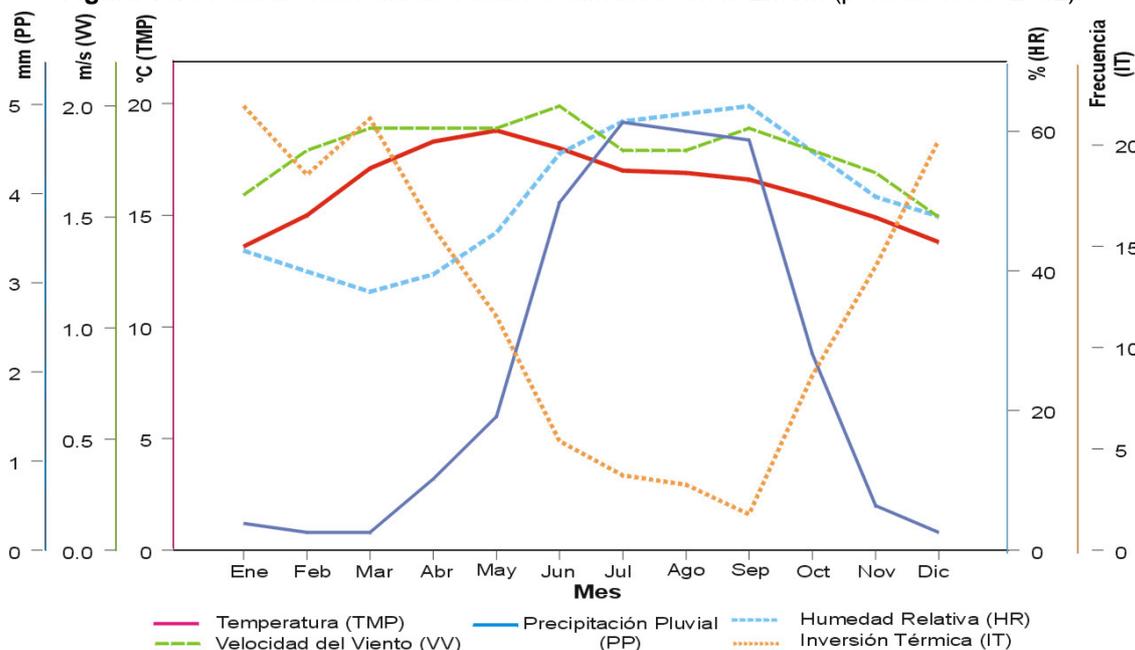
A pesar de la disminución de las concentraciones de los contaminantes criterio en la ZMVM, los niveles de ozono y partículas aún son preocupantes, pues son los contaminantes que rebasan en más ocasiones sus normas de salud correspondientes. La meta del Proaire 2002–2010 es salvaguardar la salud de la población, evitando su exposición a niveles de contaminación de riesgo. Los efectos en la salud debido a una mala calidad del aire, implican costos en el bienestar de la población y la economía, debido a gastos de atención médica y pérdida de productividad laboral.

El efecto de la contaminación en la salud de las personas se asocia con el tipo de exposición. Una exposición aguda se refiere a exponerse a concentraciones elevadas de contaminantes durante un corto tiempo y una exposición crónica se refiere a exponerse a concentraciones relativamente bajas durante un largo período. La susceptibilidad individual varía dependiendo de la predisposición genética, la edad, el estado de nutrición, la presencia y severidad de afecciones cardiacas y respiratorias. Los niños menores de 5 años, las personas de la tercera edad (mayores de 65 años) y las personas con enfermedades respiratorias o con asma, constituyen la población con mayor riesgo a la exposición de los contaminantes.

Otros factores que determinan el nivel de riesgo son la frecuencia y duración de la exposición, el tipo de contaminante y su concentración, el lugar, la hora y día de la semana, asimismo el clima que determina el tiempo de permanencia y comportamiento de los contaminantes. En la ZMVM se definen dos épocas climáticas, la época de *lluvias* de junio a octubre, la cual se caracteriza por la afluencia de aire marítimo con alto contenido de humedad, y la época de *secas* de noviembre a mayo, caracterizada por su bajo contenido de humedad. Esta última se divide en dos subépocas, *seca-fría* de noviembre a febrero y *seca-caliente* de marzo a mayo.

En la Figura 10 se muestra el patrón mensual de variables climáticas en la ZMVM, su influencia en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos motiva su consideración para evaluar el cumplimiento de los límites permisibles contenidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Salud Pública, bajo el enfoque de las tres épocas climáticas mencionadas.

**Figura 10.** Promedio mensual de variables climáticas en la ZMVM (período 1990–2002).



## Indicadores

En este capítulo se presentan los indicadores que reflejan el impacto que tiene el estado de la calidad del aire en la salud de la población. En primer lugar se presentan los límites máximos permisibles contenidos en las NOM de protección a la salud. En el caso de O<sub>3</sub> y PM<sub>10</sub> se hace un análisis más profundo mediante el indicador del *promedio superior a un límite*, el cual refleja de manera indirecta el nivel de riesgo por exposición a concentraciones superiores al valor de la NOM correspondiente.

### ➤ Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental

El indicador empleado se refiere al número de días o muestreos anuales con valores arriba de los límites permisibles definidos en las NOM y la exposición que caracterizan (aguda o crónica).

**Tabla 10.** Normas Oficiales Mexicanas, Salud Ambiental<sup>a</sup>.

CONTAMINANTE (NOM)	VALORES LÍMITE PERMISIBLES		
	EXPOSICIÓN AGUDA		EXPOSICIÓN CRÓNICA
	CONCENTRACIÓN Y TIEMPO PROMEDIO	FRECUENCIA MÁXIMA ACEPTABLE	CONCENTRACIÓN Y TIEMPO PROMEDIO
Ozono (O <sub>3</sub> ) (NOM-020-SSA1-1993)	0.11 ppm (1 hora)	1 vez al año en 3 años	-----
Monóxido de Carbono (CO) (NOM-021-SSA1-1993)	11 ppm (máximo diario de promedios móviles de 8 horas)	1 vez al año	-----
Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) (NOM-022-SSA1-1993)	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm (promedio aritmético anual)
Bióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) (NOM-023-SSA1-1993)	0.21 ppm (1 hora)	1 vez al año	-----
Partículas Suspendidas Totales (PST) (NOM-024-SSA1-1993)	260 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	1 vez al año	75 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético anual)
Partículas menores a 10 micrómetros (PM <sub>10</sub> ) (NOM-025-SSA1-1993)	150 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	1 vez al año	50 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético anual)
Plomo (Pb) (NOM-026-SSA1-1993)	-----	-----	1.5 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético de 3 meses)

<sup>a</sup> Publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 23 de diciembre de 1994.

### ➤ Promedio superior al límite permisible de Ozono y PM<sub>10</sub>

En la ZMVM las concentraciones horarias de O<sub>3</sub> superan durante varias horas al día el límite de protección que establecen las NOM, lo que puede significar un mayor riesgo de exposición. El indicador del *promedio superior al límite* 0.110 ppm, es una referencia indirecta al riesgo anual de rebasarlo. En el caso de las PM<sub>10</sub> el indicador del *promedio superior al límite* 150 µg/m<sup>3</sup> se refiere a la información que proveen los muestreos de 24 horas y se visualiza de forma anual también.

En la ZMVM las concentraciones de O<sub>3</sub> y PM<sub>10</sub> tienen un comportamiento espacial diferenciado, en el caso del O<sub>3</sub> el suroeste representa la región con un mayor riesgo para la salud de la población, mientras que las PM<sub>10</sub> representan un mayor riesgo en el noreste. Por esta razón se realiza un análisis espacial del comportamiento de este indicador.

La distribución espacial de este indicador en 4 años clave de la gestión de la calidad del aire (1990, 1995, 2000 y 2001) en la ZMVM, se pueden consultar en <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnindicadores.htm>

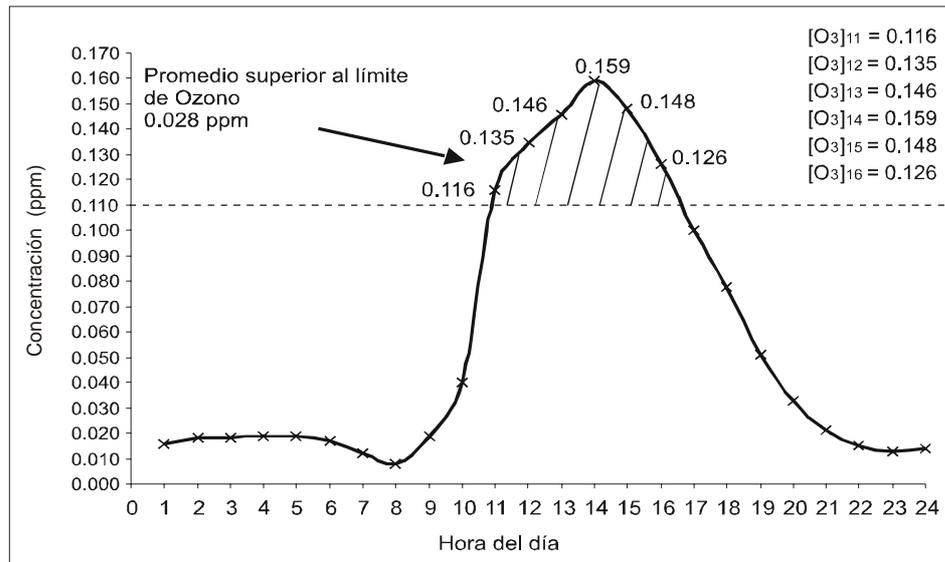
El indicador se construye de la siguiente manera:

• *Promedio superior al límite de O<sub>3</sub>*. Se obtiene como la suma de las diferencias de los datos horarios del día ([concentración]<sub>hr</sub>) mayores a 0.110 ppm (L<sub>p</sub>), y se divide por el número de horas consideradas. La siguiente ecuación resume el cálculo.

$$Pr\ om.Sup.L_{p\ día} = \frac{\sum_{[concentración]_{hr} > L_p} ([concentración]_{hr} - L_p)}{\text{horas del día que se excede el límite permisible}}$$

Un ejemplo del cálculo para O<sub>3</sub> sería: en un día hipotético se presentan 6 horas con concentraciones horarias superiores a 0.110 ppm (Figura 11).

**Figura 11.** Comportamiento diario del O<sub>3</sub> en una estación hipotética



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

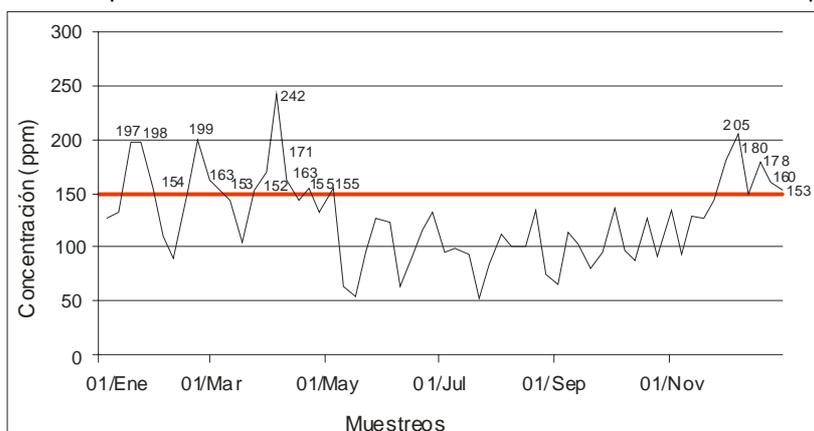
$$Pr\ om.Sup.L_{p\ día} = \frac{(0.116 - 0.110) + (0.135 - 0.110) + (0.146 - 0.110) + (0.159 - 0.110) + (0.148 - 0.110) + (0.126 - 0.110)}{6} = 0.028\ ppm$$

•Promedio superior al límite de PM<sub>10</sub>. Se obtiene como la suma de las diferencias de muestreos de 24 horas ([concentración]<sub>muestreo</sub>) mayores a 150 µg/m<sup>3</sup> (L<sub>p</sub>) y se divide por el número de muestreos considerados. La siguiente ecuación resume el cálculo:

$$Pr\ om.Sup.L_{p\ anual} = \frac{\sum_{[concentración]_{muestreo} > L_p} ([concentración]_{muestreo} - L_p)}{\text{muestreos del año que se excede el límite permisible}}$$

Un ejemplo del cálculo para PM<sub>10</sub> sería el siguiente: en un año hipotético las concentraciones registradas en muestreos de 24 horas presentan el comportamiento de la Figura 12.

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



El cálculo del promedio superior al límite de 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se obtiene de la siguiente manera:

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

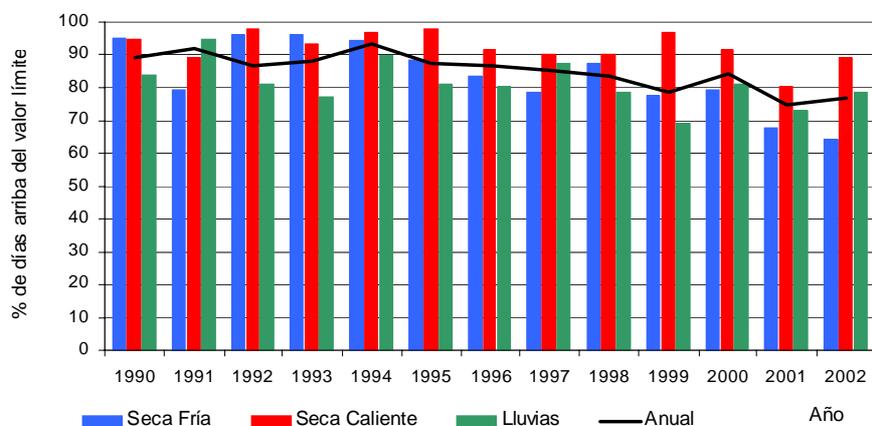
## Ozono

La NOM 020–SSA1–1993 establece como límite para evaluar la calidad del aire con respecto al  $\text{O}_3$  y proteger la salud de la población susceptible, una concentración máxima de 0.110 ppm, para no ser rebasada más de una hora, una vez al año cada tres años.

La Figura 13 muestra la disminución paulatina que ha tenido el porcentaje de días con concentraciones superiores al límite de 0.110 ppm de la NOM. En 1990 se rebasó en nueve de cada diez días, en 2001 y 2002 en siete de cada diez días, aproximadamente.

La época del año con un mayor porcentaje<sup>8</sup> de días arriba del límite de  $\text{O}_3$  es la seca-caliente, con aproximadamente nueve de cada diez días. Esta situación sugiere una mayor atención a los posibles riesgos a la salud que se presentan en esta época. Por otra parte, es notable la disminución paulatina desde 1995 en la época seca-fría, lo cual puede asociarse a la menor frecuencia de inversiones térmicas registradas en la ZMVM en los últimos años.

**Figura 13.** Porcentaje de días al año arriba del valor límite de la NOM de  $\text{O}_3$  en la ZMVM. Análisis anual y épocas climáticas, 1990-2002.



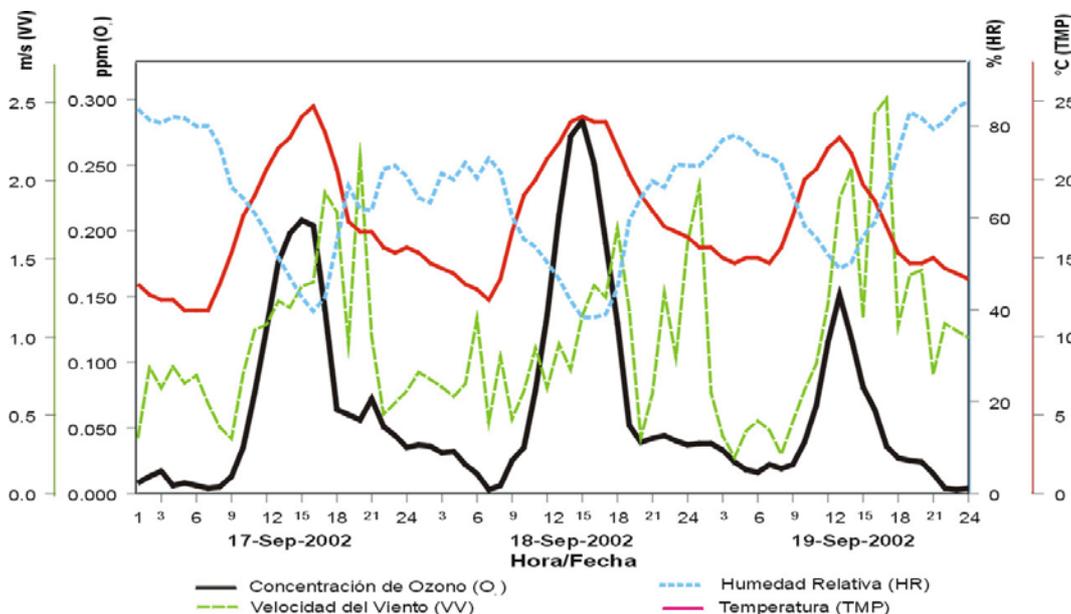
<sup>8</sup> Este porcentaje difiere de la información que proporciona el IMECA, ya que este último se genera con información preliminar que no considera el desempeño posterior de las estaciones.

La disminución de O<sub>3</sub> observada en el análisis de las concentraciones máximas diarias del Capítulo 3 y en el porcentaje de días arriba del valor límite de la NOM, se refleja en la disminución del número de ocasiones en que se ha instrumentado la Fase de Precontingencia y la Fase I del Plan de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) en los últimos años (Tabla 11), a pesar de que el 18 de septiembre de 2002 fue necesario instrumentar la Fase I del PCAA por 24 horas. La Figura 14 muestra el comportamiento del O<sub>3</sub> y las variables meteorológicas que registra el SIMAT, un día antes y después de que ocurriera esta emergencia ambiental.

**Tabla 11.** Casos de Precontingencias, Fase I y Fase II para O<sub>3</sub> en la ZMVM (1990–2002), bajo el esquema actual del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

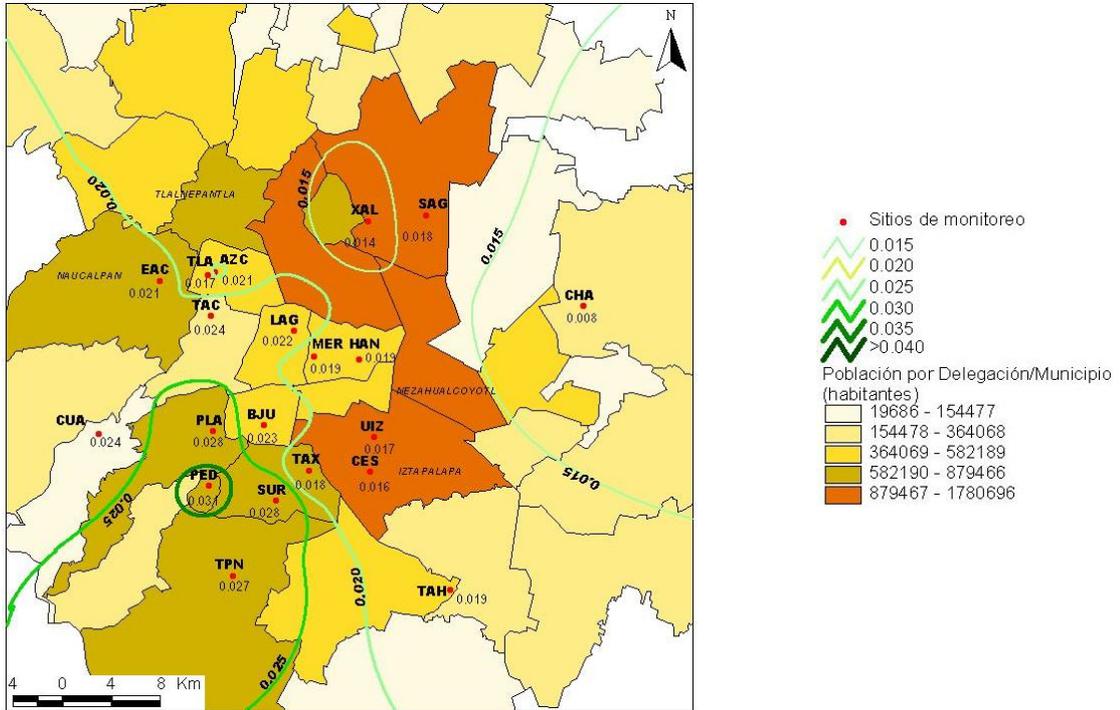
	Año	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Precontingencia	Ozono	78	217	167	103	127	147	86	72	77	39	24	14	9
Fase I	Ozono	--	2	4	12	1	5	3	3	4	3	0	0	1
	Ozono- PM <sub>10</sub>	--	--	--	--	--	--	--	--	0	0	0	0	0
Fase II	Ozono	--	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 14.** Contingencia Fase I para O<sub>3</sub> aplicada el 18 de Septiembre de 2002 en la ZMVM.



El cálculo del promedio superior al límite de O<sub>3</sub> (Mapa 2) arroja valores que oscilan entre 0.005 y 0.030 ppm, correspondiendo los valores altos al suroeste de la ZMVM. Este comportamiento sugiere que hay un mayor riesgo para la población de esta región, dado que se exponen durante varias horas a concentraciones que rebasan el límite permisible. Las delegaciones políticas de esta región concentran entre 475,000 y 875,000 habitantes. Esta distribución espacial es similar a la obtenida en 2001, al comparar con los resultados de 1990 y 1995 se observa una disminución del posible riesgo por exposición a concentraciones de O<sub>3</sub> que superan el límite permisible en toda la ZMVM.

**Mapa 2.** Distribución espacial del promedio superior al límite de O<sub>3</sub>, 2002.

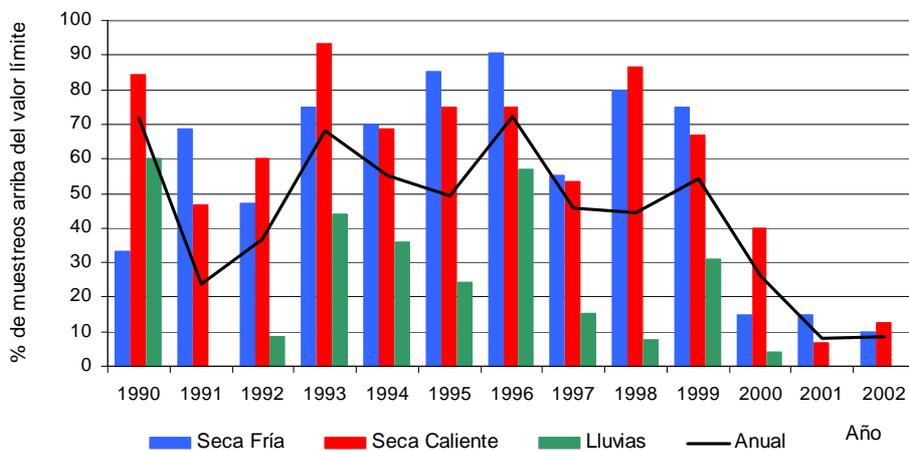


## PARTÍCULAS MENORES A 10 MICRÓMETROS

La NOM-025-SSA1-1993 de salud ambiental establece dos límites para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a las PM<sub>10</sub>, el primero permite evaluar la exposición aguda (150 µg/m<sup>3</sup> en 24 horas) y el segundo para exposición crónica (50 µg/m<sup>3</sup> como media aritmética anual).

Desde 1999 hay una disminución considerable del porcentaje de muestreos que superan el límite de la NOM, 2001 y 2002 son los mejores años dado que sólo en uno de cada doce muestreos se rebasó este límite (Figura 15). El análisis por épocas climáticas muestra que la mayor frecuencia de excedencias continúan presentándose en la época seca-caliente y seca-fría.

**Figura 15.** Porcentaje de muestreos al año arriba del valor límite de la NOM de PM<sub>10</sub> Análisis anual y épocas climáticas, 1990-2002.



A pesar del decremento de las PM<sub>10</sub> en 2001 y 2002, al evaluar el promedio anual de 50 µg/m<sup>3</sup><sup>9</sup> se encuentra que aun se excede significativamente en la mayoría de las estaciones de monitoreo. En los años mencionados solamente una estación cumple con esta norma (Tabla 12).

**Tabla 12.** Promedio aritmético anual de muestreos de PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) en la ZMVM (1990–2002).

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
MÁXIMO	187	127	139	188	163	155	191	155	144	159	125	95	95
MÍNIMO	64	62	50	58	55	50	46	38	52	43	44	42	41
# estaciones. que cumplen con la NOM	0	0	0	0	0	1	2	1	0	1	1	1	1

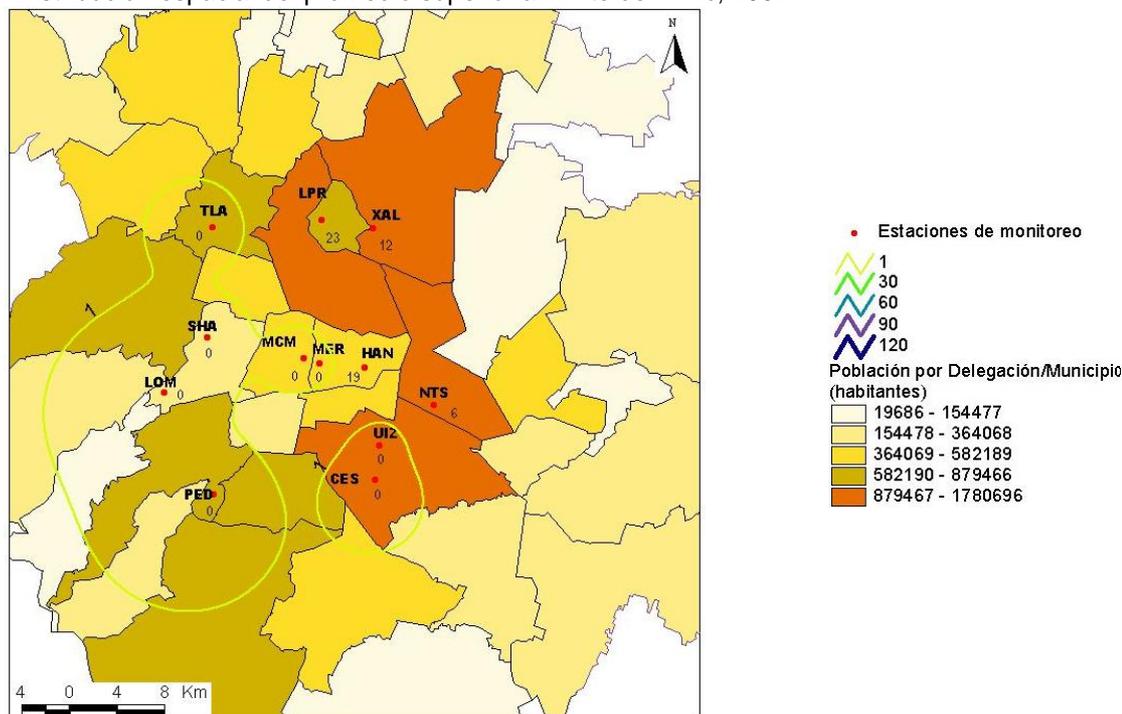
La necesidad de instrumentar alguna de las fases del PCAA por niveles altos de PM<sub>10</sub> sólo ocurrió en 1998 y 2000 (Tabla 13).

**Tabla 13.** Casos de Precontingencias, Fase I y Fase II para PM<sub>10</sub> en la ZMVM, bajo el esquema actual del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

Año		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Precontingencia	PM <sub>10</sub>	--	--	--	--	--	--	--	--	4	0	3	1	0
Fase I	PM <sub>10</sub>	--	--	--	--	--	--	--	--	1	0	1	0	0
	Ozono- PM <sub>10</sub>	--	--	--	--	--	--	--	--	0	0	0	0	0
Fase II	PM <sub>10</sub>	--	--	--	--	--	--	--	--	0	0	0	0	0

El indicador del promedio superior al límite de 150 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub> (Mapa 3), muestra a las estaciones localizadas en los municipios de Nezahualcóyotl y Ecatepec con valores que oscilan entre 6 y 23 µg/m<sup>3</sup>. En estos municipios la densidad de población es mayor a los 875,000 habitantes. En el resto de la ZMVM el valor del indicador es cero. Al comparar estos resultados con los obtenidos en 2001, se observa una disminución considerable del valor de este indicador en las estaciones Museo de la Ciudad de México (MCM), La Presa (LPR) y Xalostoc (XAL), mientras que en Nezahualcóyotl Sur (NTS) y Hangares (HAN) se incrementa.

**Mapa 3.** Distribución espacial del promedio superior al límite de PM<sub>10</sub>, 2002.



<sup>9</sup> El promedio anual de PM<sub>10</sub> se obtuvo para cada estación de monitoreo, reportando el mínimo y el máximo valor; asimismo, se comparan con el límite permisible anual y se cuentan las estaciones que no lo exceden. Los promedios anuales de PST, Pb y SO<sub>2</sub>, se calcularon de igual manera.

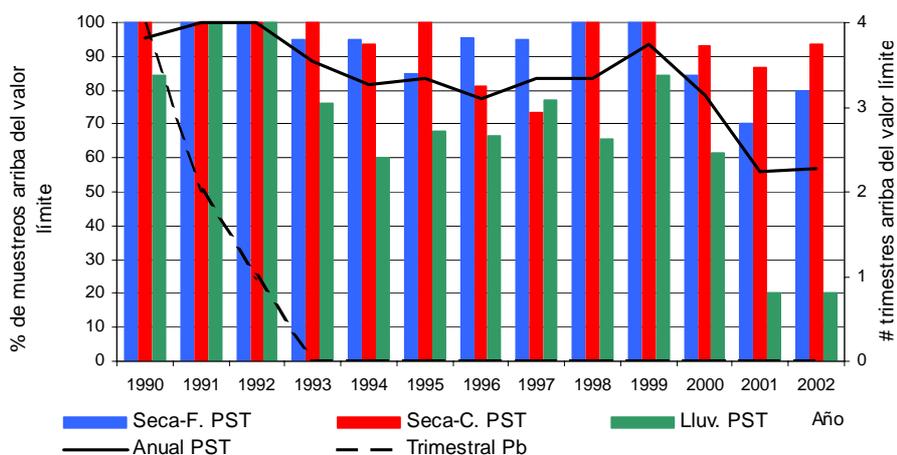
## PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y PLOMO

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 evaluar la exposición crónica. Por su parte, la NOM-026-SSA1-1993 para Pb, establece como límite permisible concentración promedio de  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en 3 meses para exposición crónica.

En la Figura 16 se observa una disminución paulatina del porcentaje de muestreos de PST que exceden los  $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sin embargo, en 2001 y 2002 aún se rebasa este límite en cinco de cada diez muestreos realizados. La época de secas (seca-fría y seca-caliente) presenta mayor porcentaje de días arriba del límite de PST, con ocho de cada diez muestreos por arriba del límite en seca-fría y nueve de cada diez en seca-caliente, situación que sugiere mayor atención a posibles riesgos a la salud que se presentan en estas épocas. La presencia de niveles altos de PST en la ZMVM, refleja un problema generalizado debido a que el indicador del promedio anual sobrepasa el valor de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en todas las estaciones (Tabla 14).

En el caso del Pb contenido en PST, en la Figura 16 se observa que desde 1993 no se excede el valor de la norma.

**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 épocas climáticas, 1990-2002.



**Tabla 14.** Promedio aritmético anual de muestreos de PST ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en la ZMVM (1990-2002).

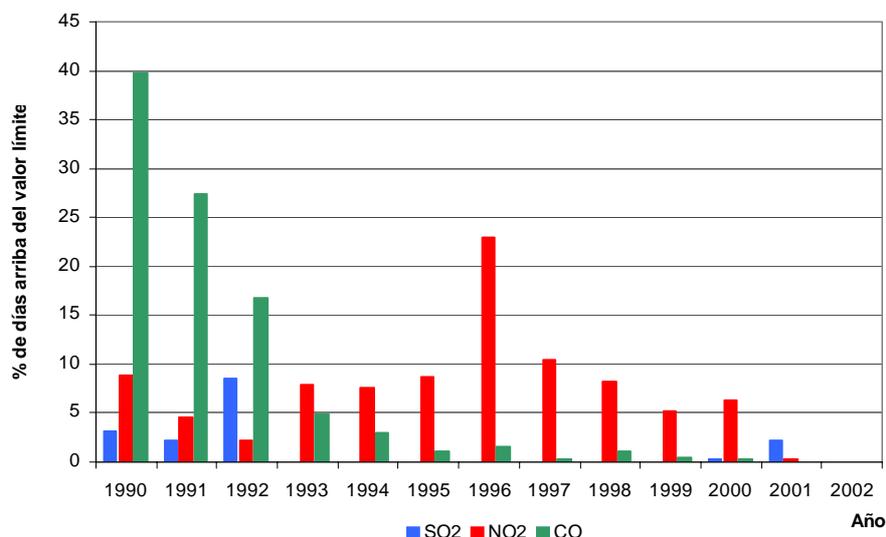
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
MÁXIMO	639	957	702	433	413	375	365	405	431	466	369	277	276
MÍNIMO	125	130	91	108	101	100	109	92	156	140	127	97	94

## DIÓXIDO DE AZUFRE, DIÓXIDO DE NITRÓGENO Y MONÓXIDO DE CARBONO

En el capítulo anterior se menciona que el CO y el  $\text{NO}_2$  presentan una disminución paulatina desde 1990 en sus niveles, hasta alcanzar los más bajos en 2001 y 2002. Esta situación se refleja también en el hecho de que ambos contaminantes no rebasaron los límites que establecen sus NOM. La NOM-021-SSA1-1993, especifica que el CO no debe rebasar una concentración de 11 ppm, como promedio móvil de 8 horas y la NOM-023-SSA1-1993, especifica que el  $\text{NO}_2$  no debe rebasar una concentración de 0.21 ppm, promedio de una hora.

El repunte que tuvieron las concentraciones de SO<sub>2</sub> en 2000 y 2001 se refleja en excedencias a la NOM-022-SSA1-1993, que señala como límite máximo aceptable una concentración de 0.130 ppm, durante 24 horas, una vez al año. En la Figura 17 se aprecia que estas excedencias representaron uno de cada cien días en 2000 y tres de cada cien días en 2001.

**Figura 17.** Porcentaje de días al año arriba del valor límite de la NOM de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y CO en la ZMVM, 1990-2002.



La NOM de SO<sub>2</sub> recomienda evaluar como indicador de exposición crónica, un promedio anual de 0.030 ppm. En la Tabla 15 se observa una disminución general en el valor de este indicador, sin embargo en 2000 y 2001 se alcanzó y rebasó en la estación Tlalnepantla (TLA).

**Tabla 15.** Promedio aritmético anual de SO<sub>2</sub> (ppm) en la ZMVM (1990–2002).

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
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
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
# estaciones que exceden la NOM	11	11	11	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0



## CAPÍTULO 5. DEPÓSITO ATMOSFÉRICO

### DEPÓSITO HÚMEDO

El *depósito atmosférico* es la cantidad (expresada en unidades de masa por unidad de superficie) de cualquier contaminante atmosférico suspendido en la atmósfera; cuando desciende al suelo por acción del viento o de la fuerza de gravedad se denomina *depósito seco* y cuando desciende por efecto de algún tipo de precipitación meteorológica<sup>10</sup> se denomina *depósito húmedo*.

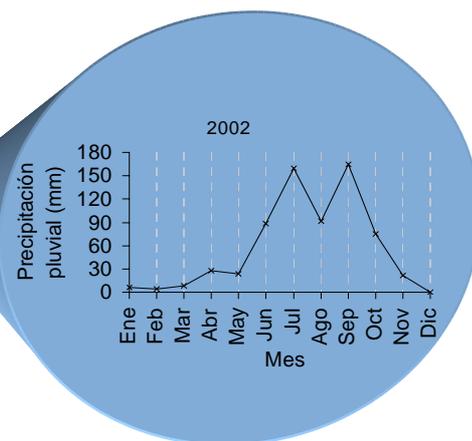
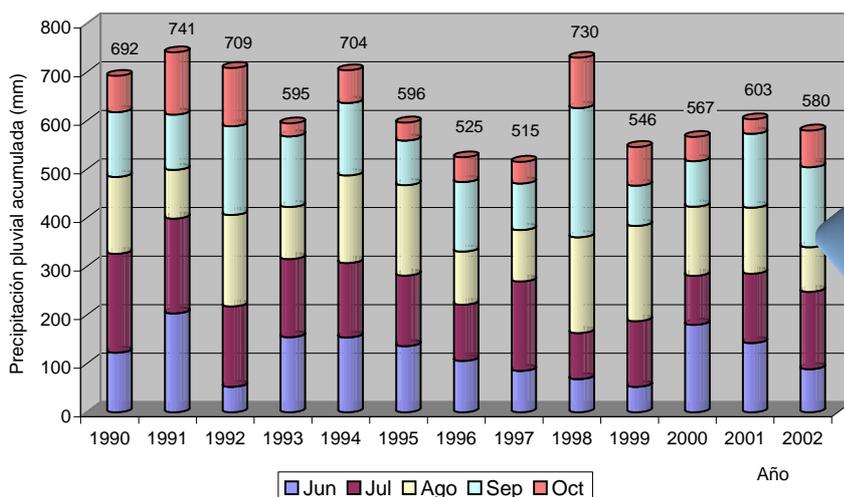
Las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> a la atmósfera, en combinación con la humedad, propician la formación de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). El monitoreo del depósito húmedo con estas características, también conocido como *depósito ácido* o *lluvia ácida*, permite estimar la transferencia de contaminantes a los ecosistemas terrestres y acuáticos, y amplía el conocimiento acerca de su flujo químico y dinámica atmosférica. En condiciones normales el agua de lluvia tiene una acidez ligera (pH 5.6), dado que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se transforma en ácido carbónico en presencia de humedad.

### COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN LA ÉPOCA DE LLUVIAS DE LA ZMVM

Durante la época de lluvias (junio a octubre) la solubilidad y arrastre de contaminantes provoca su disminución en la atmósfera de la ZMVM; sin embargo, se desconoce su impacto en el suelo de conservación, cuerpos de agua, bosques urbanos y materiales expuestos a la intemperie. Esta situación destaca la importancia del análisis de la composición y propiedades<sup>11</sup> del agua de lluvia, como base para la definición de indicadores del impacto del depósito húmedo.

En 2002 el promedio de precipitación pluvial acumulada en la ZMVM fue de 580 mm, el 56% se captó en julio y septiembre (Figura 18). Este volumen de precipitación se puede calificar como "intermedio" si se compara con los registros obtenidos desde 1990.

**Figura 18.** Precipitación pluvial captada durante la época de lluvias (junio-octubre) en la ZMVM (período 1990–2002).



Fuente de datos: DGCOH

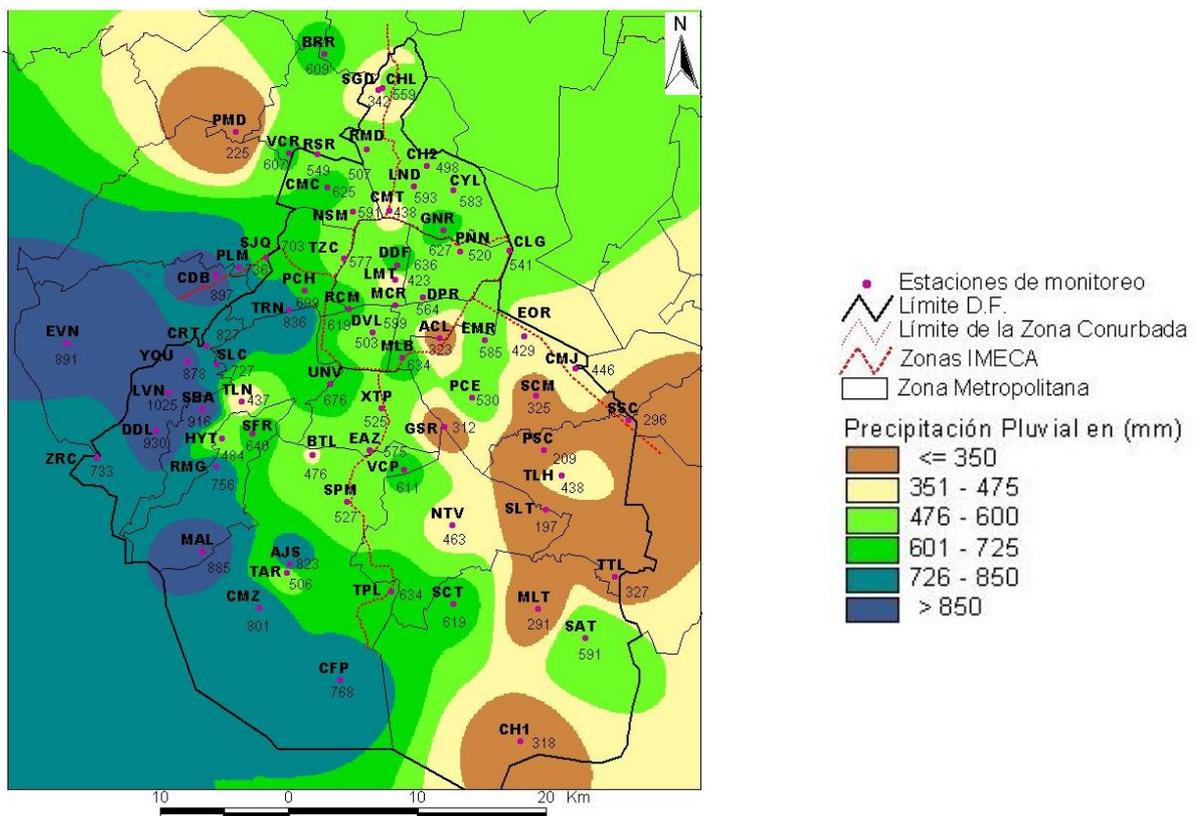
<sup>10</sup> Precipitación pluvial, nieve, rocío, niebla, neblina, agua nieve o granizo

<sup>11</sup> Las propiedades químicas del agua de lluvia que se analizan son pH, aniones y cationes. La conductividad específica se analiza como característica física.

En 2002 la distribución espacial del volumen de precipitación pluvial en la ZMVM, presentó los niveles máximos en la región que comprenden las delegaciones Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Tlalpan, Álvaro Obregón y los municipios del Estado de México Huixquilucan y Naucalpan. Los niveles bajos se registraron la región que comprende las delegaciones Tláhuac, Iztapalapa, Milpa Alta y los municipios localizados al este (Mapa 4).

En general, al analizar los iones del depósito húmedo y considerar el comportamiento temporal y espacial de la precipitación pluvial de la ZMVM, se encuentra que los mayores depósitos se presentaron en los meses de julio y septiembre, en la zona suroeste de la Ciudad de México.

**Mapa 4.** Precipitación pluvial acumulada en la época de lluvias en la ZMVM (2002).



Fuente de datos: DGCOH

## COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE IONES EN AGUA DE LLUVIA

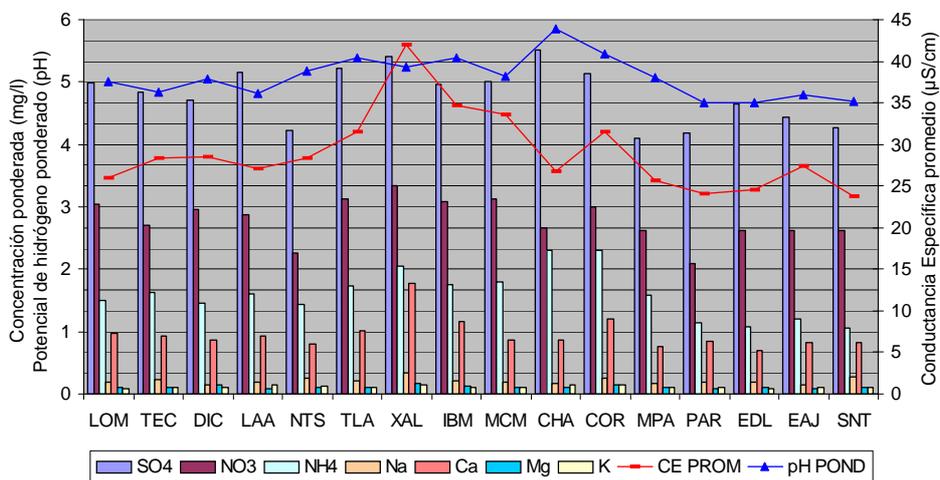
La concentración ponderada de iones (expresada en mg/l de agua) y la conductancia específica<sup>12</sup> (CE), son parámetros que determinan la calidad del agua de lluvia. La REDDA del SIMAT realiza mediciones de iones de origen antropogénico (sulfatos,  $SO_4^{2-}$ ; nitratos,  $NO_3^-$ ; amonio,  $NH_4^+$ ) y natural (sodio,  $Na^+$ ; calcio,  $Ca^{2+}$ ; magnesio,  $Mg^{2+}$ ; potasio,  $K^+$ ).

En 2002 la concentración ponderada de los iones  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  y  $NH_4^+$ , fue 4.8, 2.8 y 1.6 mg/l, respectivamente. Los valores máximos corresponden a estaciones de monitoreo localizadas en la

<sup>12</sup> La Conductancia Específica (o recíproco de la resistencia eléctrica) es una medida indirecta del contenido de iones totales (cationes y aniones) disueltos en agua, a mayor valor de CE mayor contenido de iones totales.

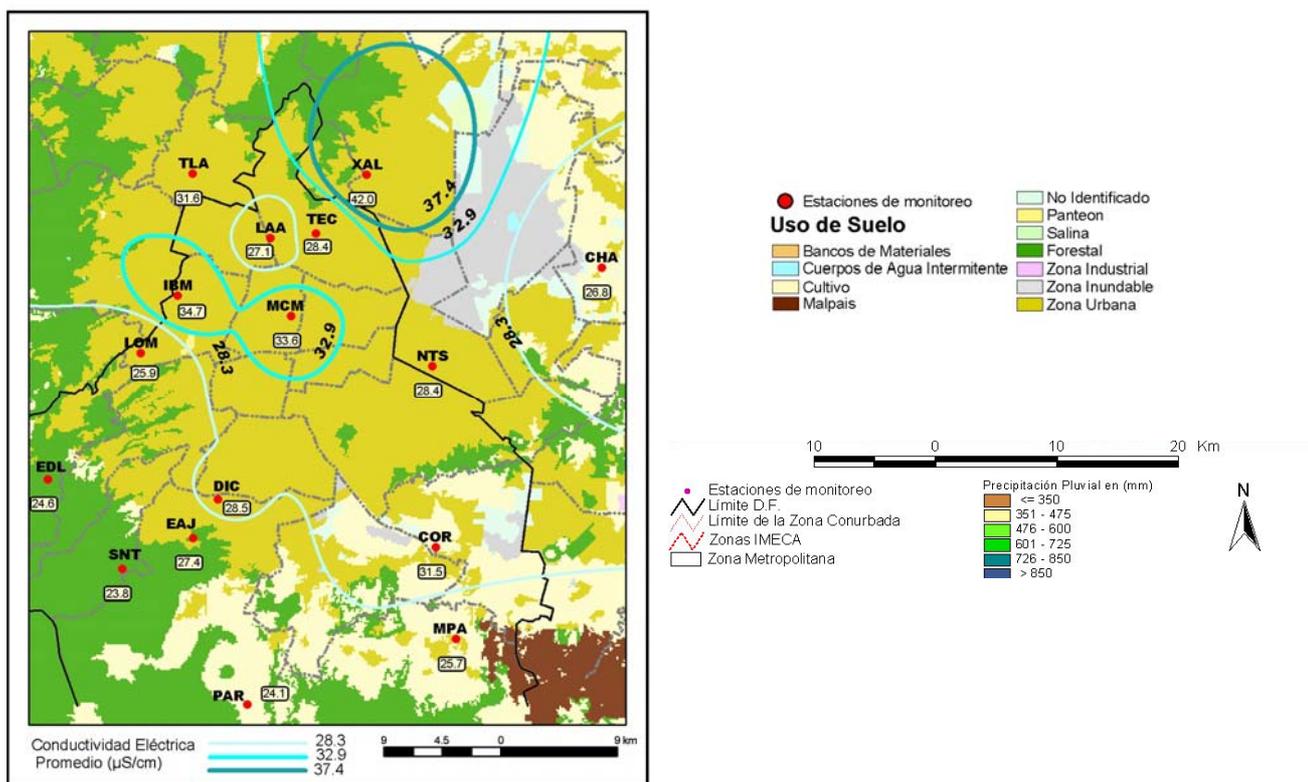
región norte de la ZMVM, donde hay una mayor concentración de industrias. El  $\text{Ca}^{2+}$  es el ion de origen natural con mayor concentración, principalmente en la estación Xalostoc (XAL). La magnitud del pH se asocia con una mayor proporción de los iones de origen antropogénico registrados en cada estación (Figura 19).

**Figura 19.** Concentración ponderada de iones (mg/l), Potencial hidrógeno y Conductancia específica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) medidas en la ZMVM durante la época de lluvias de 2002.



La CE también alcanza sus valores máximos en el noreste de la ZMVM (Figura 19), la representación espacial de este parámetro (Mapa 5 el 2002) indica que las muestras de agua de lluvia recopiladas en áreas con uso de suelo urbano - industrial, tuvieron la mayor cantidad de iones disueltos.

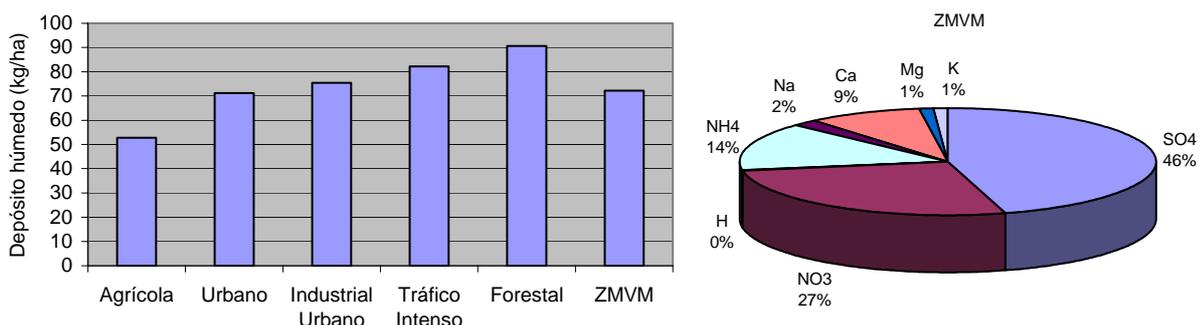
**Mapa 5.** Distribución espacial de la CE en el año 2002 y uso de suelo, en la ZMVM.



## COMPORTAMIENTO ESPACIAL DEL DEPÓSITO HÚMEDO

El análisis del depósito húmedo durante la época de lluvias de 2002, indica que los valores máximos se registraron en el suroeste, donde se localizan áreas forestales importantes. La masa total<sup>13</sup> de los iones analizados indica que las estaciones con entorno forestal (Tabla 16) captan una mayor cantidad del depósito atmosférico, contrario a lo que ocurre en estaciones con entorno agrícola (Figura 20). En toda la ZMVM el 46% de la masa total del depósito húmedo corresponde al  $\text{SO}_4^{2-}$ , 27% a  $\text{NO}_3^-$  y 14% a los  $\text{NH}_4^+$ .

**Figura 20.** Masa total depositada en la ZMVM, durante la época de lluvias de 2002 (kg/ha) y su proporción relativa promedio de iones analizados (%).



**Tabla 16.** Relación de estaciones y entorno que caracterizan.

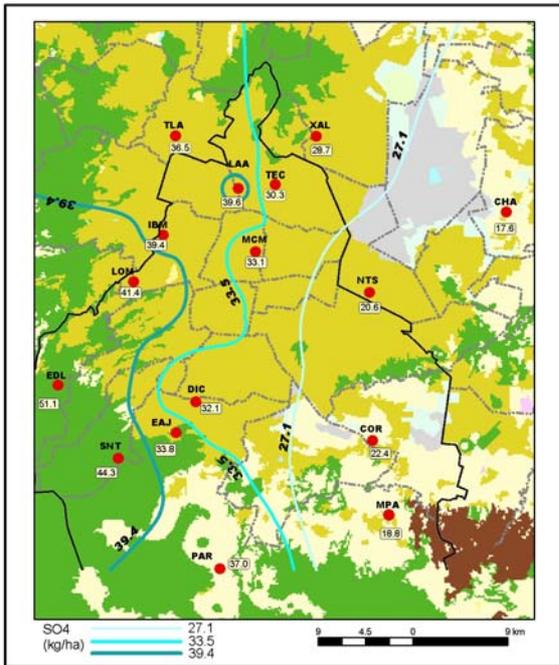
Tipo de sitio	Estación	Clave	Zona	Tipo de sitio	Estación	Clave	Zona
Agrícola	Corena	COR	SE	Urbano	Cerro del Tepeyac	TEC	NE
Agrícola	Chapingo	CHA	NE	Industrial Urbano	Tlalnepantla	TLA	NO
Agrícola	Milpa Alta	MPA	SE	Industrial Urbano	Xalostoc	XAL	NE
Agrícola	Parres	PAR	SO	Tráfico Intenso	Museo de la Ciudad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

El mayor aporte sobre áreas de reserva forestal también se observa con la distribución espacial del  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  (Mapa 6 y 7), ya que sus valores máximos se presentan en el suroeste y oeste de la ZMVM. Ambos compuestos son precursores de la acidez y su patrón de distribución coincide con el patrón del pH (Mapa 9). En 2002 los valores de pH en la región suroeste oscilaron entre 4.6 y 5.0, en 2001 los valores de pH en esta región tuvieron el mismo comportamiento.

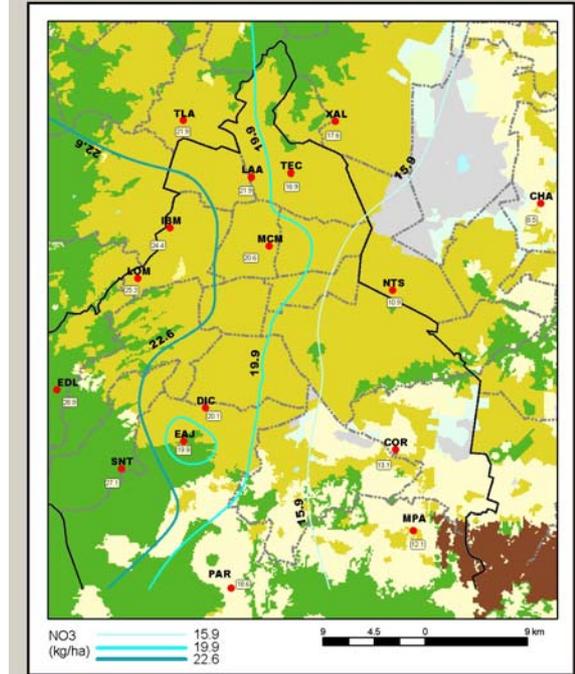
La región con mayor cantidad de iones depositados comprende las delegaciones Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan y Coyoacán, y el municipio de Huixquilucan del Estado de México, la cual coincide con la región que recibe la mayor cantidad de precipitación pluvial. Por su parte, la región de las delegaciones Gustavo A. Madero, Tláhuac y Milpa Alta, y el municipio de Tlalnepantla, registran un menor depósito.

<sup>13</sup> La masa total depositada en cada clasificación (agrícola, urbana,...) es igual a la suma de los promedios de los depósitos iónicos totales medidos en cada clasificación. Su proporción relativa promedio representa los promedios, expresados en porcentaje, de los depósitos totales de cada ion.

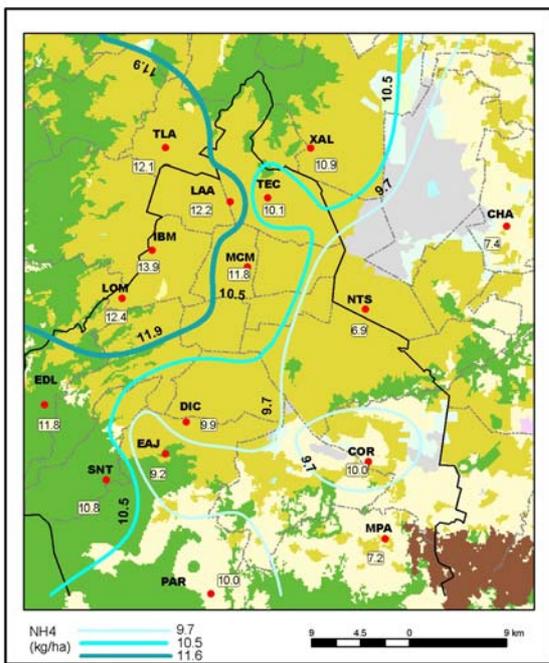
**Mapa 6.** Distribución espacial del depósito húmedo de  $\text{SO}_4^{2-}$  (kg/ha) durante la época de lluvias en la ZMVM, 2002.



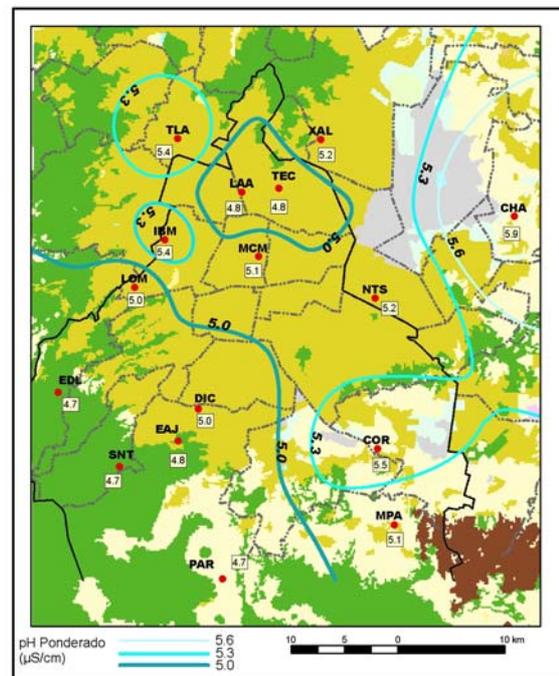
**Mapa 7.** Distribución espacial del depósito húmedo de  $\text{NO}_3^-$  (kg/ha) durante la época de lluvias en la ZMVM, 2002.



**Mapa 8.** Distribución espacial del depósito húmedo de  $\text{NH}_4^+$  (kg/ha) durante la época de lluvias en la ZMVM, 2002.



**Mapa 9.** Distribución espacial del pH durante la época de lluvias en la ZMVM, 2002.



- Estaciones de monitoreo
- No Identificado
- Panteon
- Salina
- Bancos de Materiales
- Forestal
- Cuerpos de Agua Intermitente
- Zona Industrial
- Cultivo
- Zona Inundable
- Malpais
- Zona Urbana

**Malpaís:** Cuando la superficie esta materialmente sembrada de piedras y rocas angulosas medio enterradas y sueltas, dominando los elementos grandes o pedrejonos e inclusive se presentan afloramientos de roca; son tierras inútiles para la agricultura, pero algunas veces desarrollan buenos pastos.



## BIBLIOGRAFÍA

- CAM (GDF, SEMARNAT, SSA, GEM), 2002. Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002–2010. Dirección url: <http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/proaire/proaire.htm>, consultada en febrero de 2002.
- CAM (SEMARNAP, 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 (PICCA)*, Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México.
- Diccionario Enciclopédico, 2001, *El Pequeño Larousse Ilustrado*.
- GDF, 2002, *Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2001*.
- GDF, 1999, *Inventario de Emisiones 1998*, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación.
- Gilbert O. R., 1987, *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*, Editorial Van Nostrand Reinhold. 1987. pp 204–329.
- Molina T. L. and Molina J. M., editors, 2002, *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*, Kluwer Academic Publishers.