



## ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1994 A 1996

Ma. Concepción Fortes-Rivas<sup>1</sup>, José Luis Dorbecker-Saunders<sup>2</sup>,  
Luis Alejandro Dorbecker-Saunders<sup>2</sup> y Emmanuel Rodrigo Pérez-Lozada<sup>2</sup>  
Centro de Investigación<sup>1</sup> y Escuela de Ciencias Químicas<sup>2</sup> de la Universidad La Salle

### RESUMEN

La contaminación ambiental es un problema que aqueja a las poblaciones de todo el planeta. Los contaminantes que la producen son derivados de las rutinas diarias de comercio, transportación y producción. Su crecimiento y magnitud varían según las características geográficas, meteorológicas y capacidades gubernamentales de cada región. En su mayoría los contaminantes de mayor difusión en la atmósfera terrestre presentan riesgos para la salud y bienestar de los Seres Humanos (1).

En la Ciudad de México, este problema presenta características particulares únicas, lo que indica que la calidad del aire en su Zona Metropolitana es susceptible a un estudio. La presentación de los niveles de concentración alcanzados por los principales contaminantes (ozono, bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y partículas suspendidas) durante los años 1994 a 1996, muestra si la calidad del aire ha aumentado o disminuido con el paso de los meses.

### ABSTRACT

Environmental pollution is a problem that affects the population all over the world. The caused substances are led from dialy activities of commerce, transportation and production. Their growth and magnitude change in accordance with the geographical and metereological characteristics and government capacities of each region. The majority of the more important components of the atmosphere present dangers for the health and wellbeing of Human Beings (1).

In Mexico City, this point has the goal unique features which it indicates the quality air situarion in the Metropolitan Zone. The currente studies were to analyze the level of the the reached concentration by the major contaminates (ozone, bioxide of sulfur, oxides of nitrogen, monoxide of carbone and suspended particles) during the years 1994 to 1996. This work shows if the quality of the air has increased or decreased with the months.

### INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo más de 1,100 millones de personas viven en zonas urbanas con aire insalubre, expuestas a muchos contaminantes liberados por las fuentes industriales, energéticas y vehiculares. La contaminación es particularmente severa en la Ciudad de México, donde las partículas suspendidas de los vehículos y otras fuentes contribuyen a 6,400 muertes cada año y donde el 29% de los niños tienen concentraciones elevadas de plomo en la sangre (1, 2).

La calidad del aire depende del volumen de contaminantes emitidos, de su comportamiento

físicoquímico, la metereología y el movimiento de la atmósfera en ese punto determinado (3).

Las cuestiones ambientales varían de ciudad a ciudad y de región a región. Están influenciadas por variables como: el tamaño de la ciudad, el porcentaje de crecimiento, el ingreso monetario, la geografía local, el clima y las capacidades institucionales. Cada uno de estos factores constituyen una enorme diferencia en las condiciones ambientales de un lugar a otro. Especialmente donde los gobiernos locales son débiles y no tienen financiamiento, la economía es rápida y el crecimiento de la población que aumenta estos problemas (1).



En el Valle de México se presentan características climatológicas excepcionales que lo hacen susceptible a este problema (3), entre las que se encuentra su altitud de casi 2,250 metros sobre el nivel del mar, hace que se reduzca en un 23% el oxígeno disponible para el ser vivo; rodeado en sus cuatro puntos cardinales por montañas, provoca que no tenga una circulación natural de viento, solo en la zona sur. Su situación en el centro de la República Mexicana lo dispone a la influencia de ciclones y a la vez, a gran cantidad de radiación solar por estar en el trópico de Cáncer, con lo que en la época invernal provoca estancamientos e inversiones térmicas (3).

Al ser la Ciudad de México una de las ciudades más pobladas del mundo, en ella se realizan una gran cantidad de actividades como son los establecimientos industriales, comerciales y de servicios, automóviles, transportes, etc. Así, los riesgos de la degradación de la calidad del aire son absorbidos por toda la sociedad (4).

En la República Mexicana, los contaminantes se miden a través de procedimientos estandarizados a nivel internacional en las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) (3) y son representativos de la calidad del aire promedio que se respira en la ciudad, estableciendo los Índices Metropolitanos de la Calidad del Aire (IMECAS). Éstas son reportados continuamente cada hora, los trescientos sesenta y cinco días del año.

Por lo tanto, la relación de los contaminantes en las cinco zonas importantes: Noroeste (NO), Noreste (NE), Centro (CE), Suroeste (SO) y Sureste (SE), es el objeto de esta investigación, que presenta el movimiento de los contaminantes a lo largo de todo el año comprendido en el período de 1994 a 1996, y al mismo tiempo se dan a conocer los niveles medios alcanzados. Compartimos nuestras ideas para mejorar la calidad del aire, las cuales esperamos sean tomadas en cuenta como innovadoras, inteligentes y oportunas para combatir el problema de la contaminación ambiental en esta gran urbe.

A continuación, se presenta la descripción sobre los contaminantes de mayor interés en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

(ZMCM). Posteriormente, se expone la tendencia de los principales indicadores de la calidad del aire conforme a los registrados por la RAMA en los años 1994, 1995 y 1996.

## METODOLOGÍA

Se visitaron las siguientes dependencias oficiales:

1. Oficina de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) del Departamento del Distrito Federal para obtener los registros diarios de los IMECAS desde 1994 a 1996 mediante la obtención de la media de los datos diarios y mensuales para permitir el análisis de las condiciones de la calidad del aire de la Ciudad de México, tanto por zonas geográficas como por contaminante.
2. Oficina Regional para América Latina del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), en la Ciudad de México con la finalidad de obtener información sobre los efectos de la contaminación en la salud del Ser Humano.

## DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS POR ZONAS GEOGRÁFICAS DE LA ZMVM

### 1. OZONO (O<sub>3</sub>)

En zonas urbanas es un problema difícil de resolver, pues ningún contaminante lo emite. Es producido cuando el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos reaccionan bajo los rayos solares, un proceso que toma de 8 a 10 horas (4). Las emisiones de estos compuestos producidas por los vehículos motorizados y otros procesos necesarios para la vida doméstica, comercial e industrial como la utilización de químicos orgánicos, el uso de gas natural, depósitos de basura y plantas para el tratamiento de aguas negras generan los índices más altos que cualquier otro contaminante pueda alcanzar en zonas urbanas (3).

Se ha reportado que el 25% del ozono a alturas bajas en la Ciudad de México es producido por fugas en los contenedores y tuberías que utilizan gas LP empleado en los procesos de calentamiento y cocción de alimentos. El detener estas fugas reduciría el nivel de ozono en un 25% (1, 4, 5).

El ozono es un agente oxidante reactivo que tiende a atacar células y descomponer tejidos celulares, en especial el pulmonar. Produce irritación de ojos, tos y molestias en el tórax; incremento de ataques de asma y de la susceptibilidad a contraer infecciones, en especial en los niños y ancianos.

Los efectos pulmonares observados en seres humanos saludables expuestos a concentraciones urbanas típicas de ozono consisten en un decremento de la capacidad inspiratoria, inflamación pulmonar, depresión del sistema inmunológico frente a infecciones pulmonares, una broncoconstricción moderada y síntomas subjetivos de tos y dolor al inspirar prolongadamente. Además, de los cambios agudos en la función, estructura y metabolismo pulmonar, provoca efectos sistemáticos en órganos blandos distantes al pulmón como por ejemplo el hígado (4).

## 2. BIÓXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>)

Es un gas soluble en agua, se genera tanto en fuentes naturales como en la combustión de materiales sulfatados, principalmente combustibles fósiles, carbón y aceites. Los óxidos de azufre al hidratarse dan lugar a la formación de ácidos sumamente agresivos, que provocan la acidificación de los lagos y la lluvia ácida (4).

Estos compuestos se hidratan con la humedad de las mucosas conjuntiva y nasal, provocando irritación e inflamación aguda o crónica. Penetran en los pulmones y se convierten en un agente irritante del tracto respiratorio inferior (3).

## 3. ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)

Es un gas oxidante, producido por los vehículos de motor, plantas de poder y calentamiento o generadoras de energía eléctrica. Bajo condiciones de altas presiones y temperaturas

en un motor, los átomos de nitrógeno y oxígeno en el aire reaccionan formando varios óxidos de nitrógeno, generalmente conocidos como NO<sub>x</sub>. Éstos al igual que los hidrocarburos son precursores de la formación de ozono y contribuyen a la formación de la lluvia ácida (3).

La acumulación de bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el cuerpo humano constituye un riesgo para las vías respiratorias. Además, se ha comprobado que puede alterar la capacidad de respuesta de las células en el proceso inflamatorio (3).

## 4. MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro y resulta de la combustión incompleta que ocurre cuando el carbono de los combustibles es oxidado parcialmente para convertirse en bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

El CO reduce el flujo de oxígeno en el sistema circulatorio, es particularmente peligroso para personas con afecciones cardíacas y puede provocar alteraciones al sistema nervioso central (3).

Debido al fuerte gradiente espacial que presenta este contaminante, las concentraciones encontradas en microambientes como en las banquetas de calles con intenso tránsito vehicular y en el interior de vehículos son mucho mayores que las concentraciones medidas simultáneamente en las estaciones fijas de análisis continuo, a pesar de que no se exceda la norma a nivel estación, puede haber un número considerable de personas que se vean expuestas a niveles peligrosos (7).

## 5. PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES MENORES A 10µ DE DIÁMETRO (PM10)

Las partículas suspendidas menores a 10 micras de diámetro aerodinámico tienen un origen natural o bien, se forman por reacciones fotoquímicas en la atmósfera que pueden estar constituidas por sulfatos, nitratos, sus ácidos correspondientes o por carbón orgánico (3).

Pueden ser inhaladas y llegar a los pulmones, reduciendo las funciones pulmonares y aumentando la frecuencia de las enfermedades respiratorias. Actualmente, se considera que este tipo de partículas son un mejor indicador de la calidad del aire que las partículas suspendidas totales, que anteriormente se utilizaban como contaminante criterio (3).

### RESULTADOS DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS POR ZONA GEOGRÁFICA DE LA ZMVM

Los contaminantes a los que hacemos referencia se han monitoreado desde 1988, año de la puesta en marcha de los IMECAS, y son:

#### 1. OZONO (O<sub>3</sub>)

En las Figuras 1 a 3 se presentan las concentraciones del O<sub>3</sub> en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) durante el período 1994 a 1996:

Para 1994, (Figura 1), las cinco zonas

presentaron en enero valores muy similares, ascendiendo durante el primer trimestre. El resto del año, los niveles promedio disminuyeron especialmente para la zona noreste. Volviendo a subir hacia finales de año pero en mayor proporción que en el primer mes. Las mayores concentraciones se registraron en la zona noroeste en el mes de marzo con 81.196 IMECAS, a diferencia de la zona noreste con 40.163 IMECAS en agosto.

Las concentraciones de este contaminante disminuyeron a lo largo de 1995, (Figura 2), aunque en el primer semestre se presentaron concentraciones mayores a las del mismo periodo en el año anterior. En enero, las concentraciones promedio son similares. El mayor valor se registró en la zona suroeste con 91.482 IMECAS en el mes de mayo. Asimismo, la zona noreste fue la que registró los niveles más bajos durante todo el año, con un mínimo de 40.886 IMECAS en el mes de agosto, repitiéndose el mismo patrón.

En todo 1996, (Figura 3), los niveles medios fueron irregulares con respecto a los años anteriores; sin embargo, al finalizar este año se alcanzaron niveles similares a los del inicio de

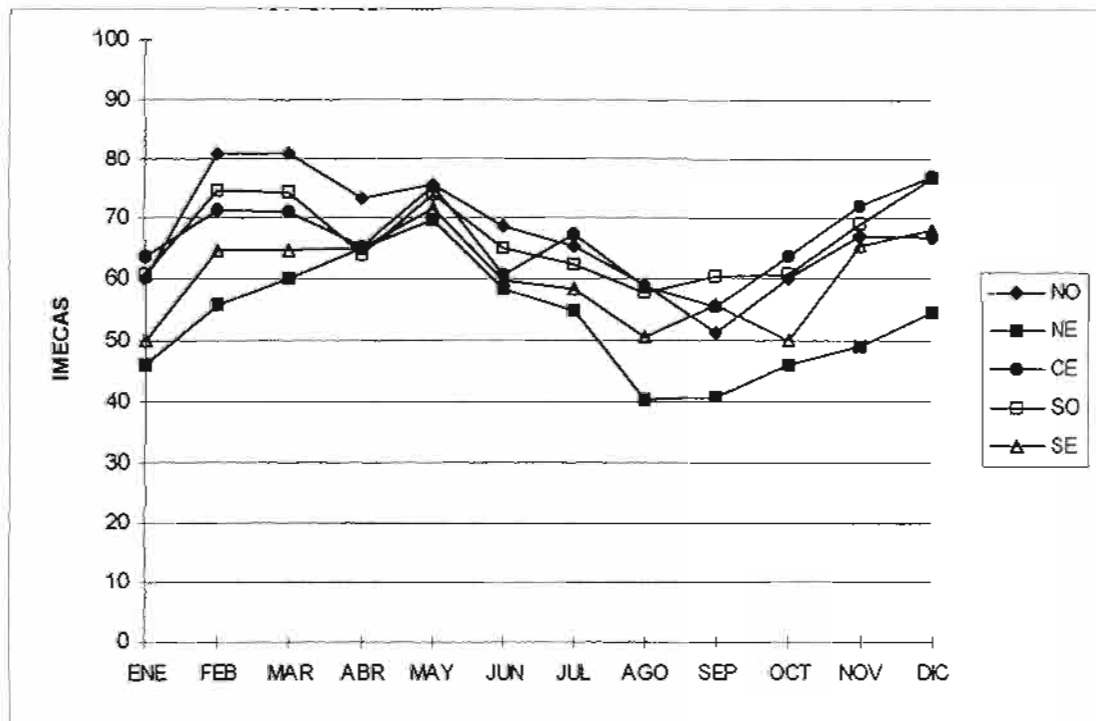


Figura 1. Concentración media del O<sub>3</sub> en 1994.

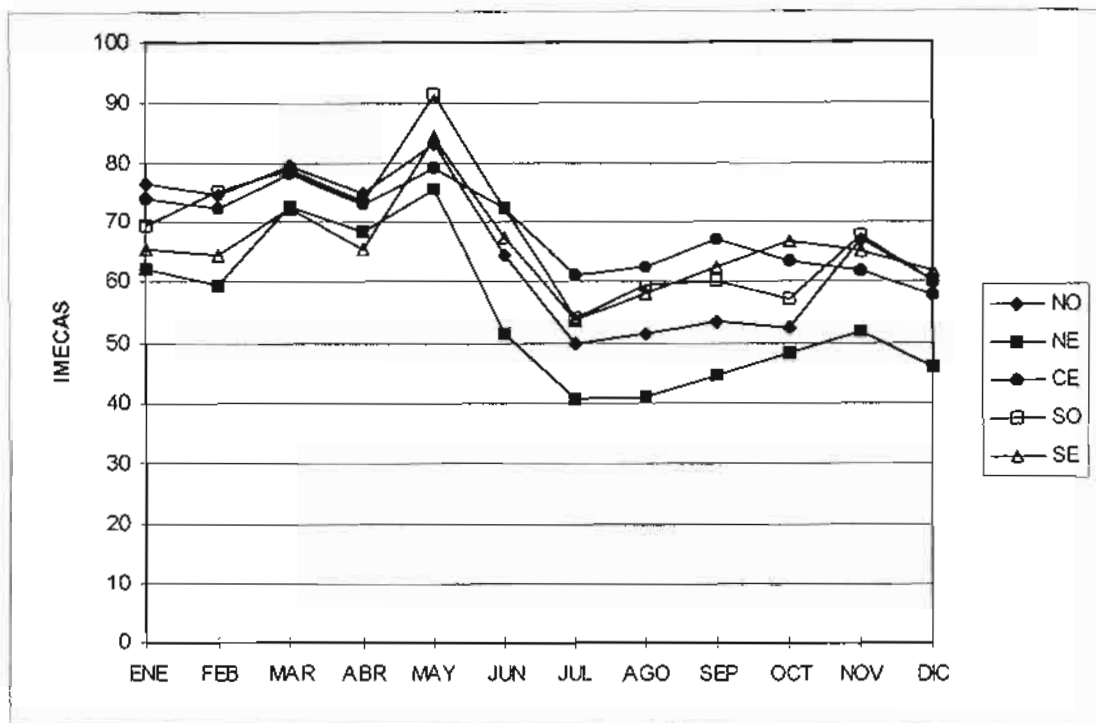


Figura 2. Concentración media del O<sub>3</sub> en 1995.

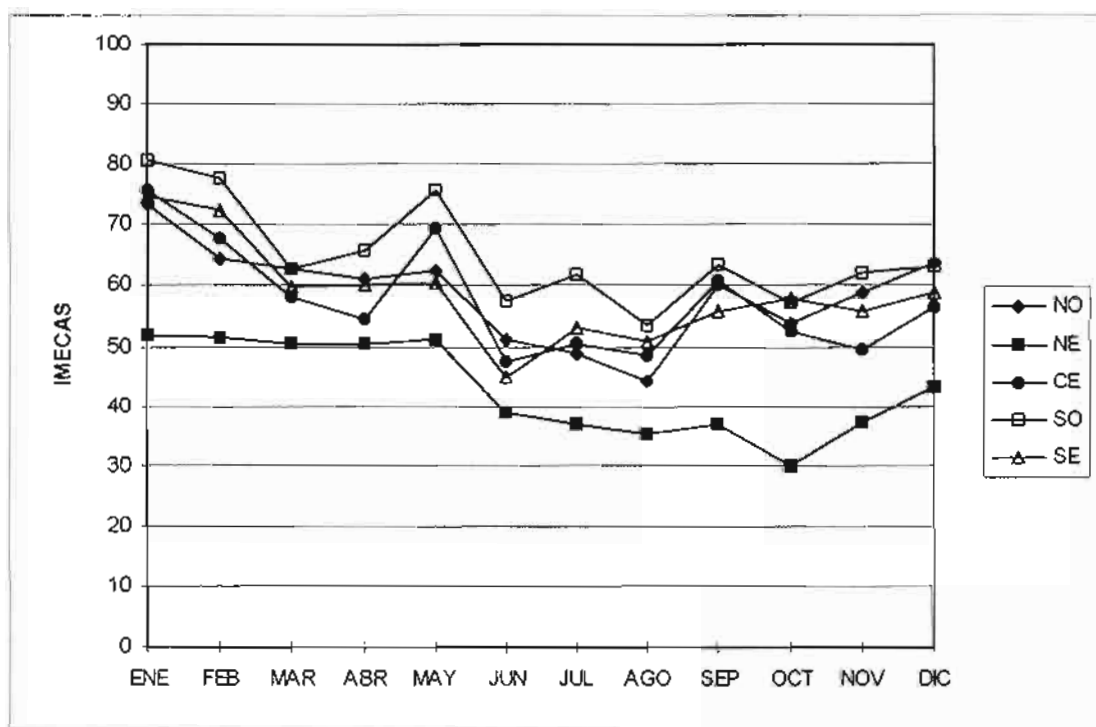


Figura 3. Concentración media del O<sub>3</sub> en 1996.

1994 o aún menores. El punto máximo se localizó en la zona suroeste durante el mes de enero con 80.897 IMECAS, y el menor valor fue para la zona noreste con 29.751 IMECAS en el mes de octubre.

La tendencia general de este contaminante para los tres años fue estable entre los 50 y los 70 IMECAS, con algunas irregularidades a lo largo de los años, en especial en el periodo de enero a abril.

La OMS recomienda un límite de exposición máxima de ozono de 0.08 ppm en una hora. Este valor máximo equivale a 57.1 IMECAS y observando las figuras anteriores se puede ver claramente que se ha rebasado esta norma durante casi todo el año, salvo excepciones como la zona noreste (3, 6).

## 2. BIÓXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>)

En las Figuras 4 a 6 se presentan los promedios del SO<sub>2</sub> reportados para la ZMVM durante el periodo 1994 a 1996:

A lo largo de 1994 (Figura 4), las

concentraciones de este contaminante se mantuvieron relativamente constantes para la zona noroeste, suroeste y sureste. No obstante, la zona centro y noreste presentaron concentraciones muy inestables, manifestándose como zonas problemáticas. La concentración más alta se registró en la zona centro con 23.656 IMECAS en el mes de marzo, mientras que la menor fue para la zona sureste con 12.226 IMECAS en diciembre.

En 1995 (Figura 5), las concentraciones del SO<sub>2</sub> reflejaron mayor variabilidad que el año anterior, aunque el rango comprendido de diciembre a enero es similar. Se observa una elevación en el periodo de agosto a octubre en la zona noreste. Los niveles mayores fueron en el mes de octubre en la zona noreste con 35.082 IMECAS, a diferencia de la zona suroeste con 12.211 IMECAS.

Para 1996 (Figura 6), se observaron concentraciones y tendencias similares a los años anteriores entre las diferentes zonas para el SO<sub>2</sub>. Se aprecia un aumento en enero y luego una disminución que se acentúa a partir del mes de julio, como se aprecia en la zona noreste, suroeste y centro. La mayor

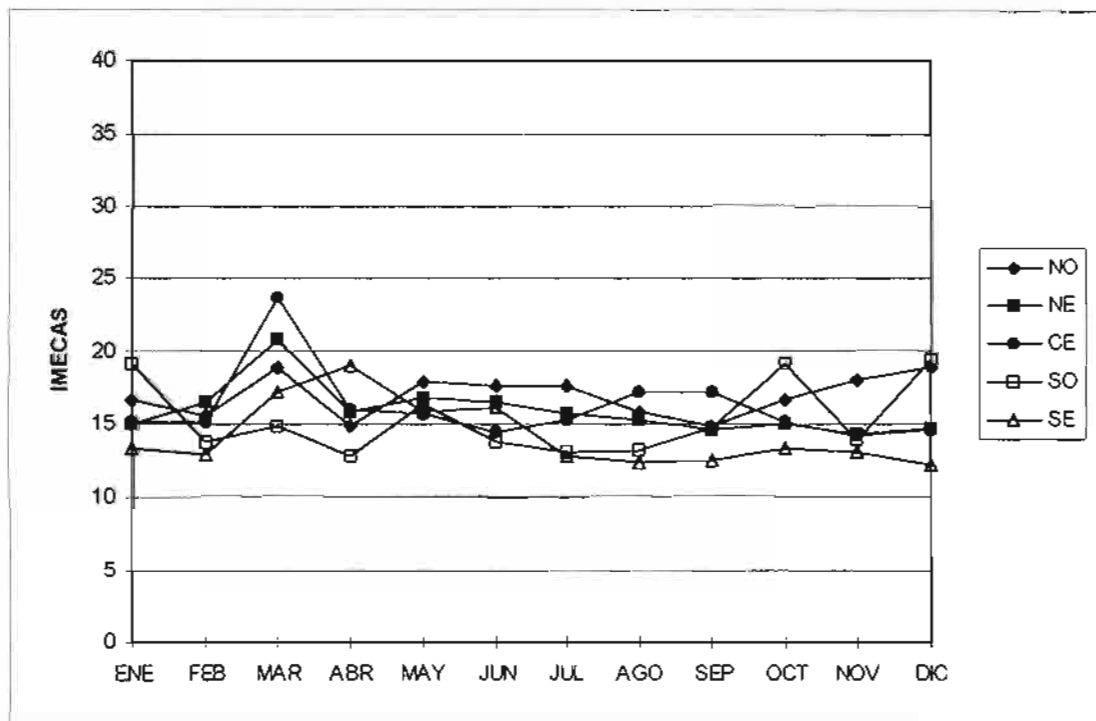


Figura 4. Concentración media del SO<sub>2</sub> en 1994.

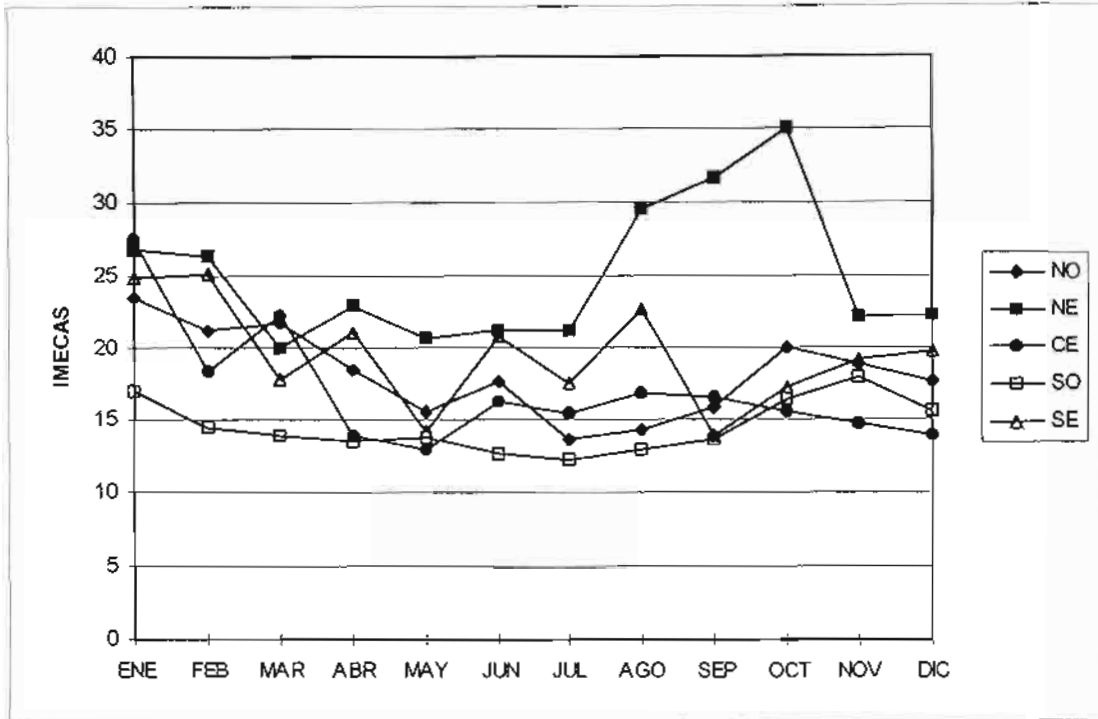


Figura 5. Concentración media del SO<sub>2</sub> en 1995.

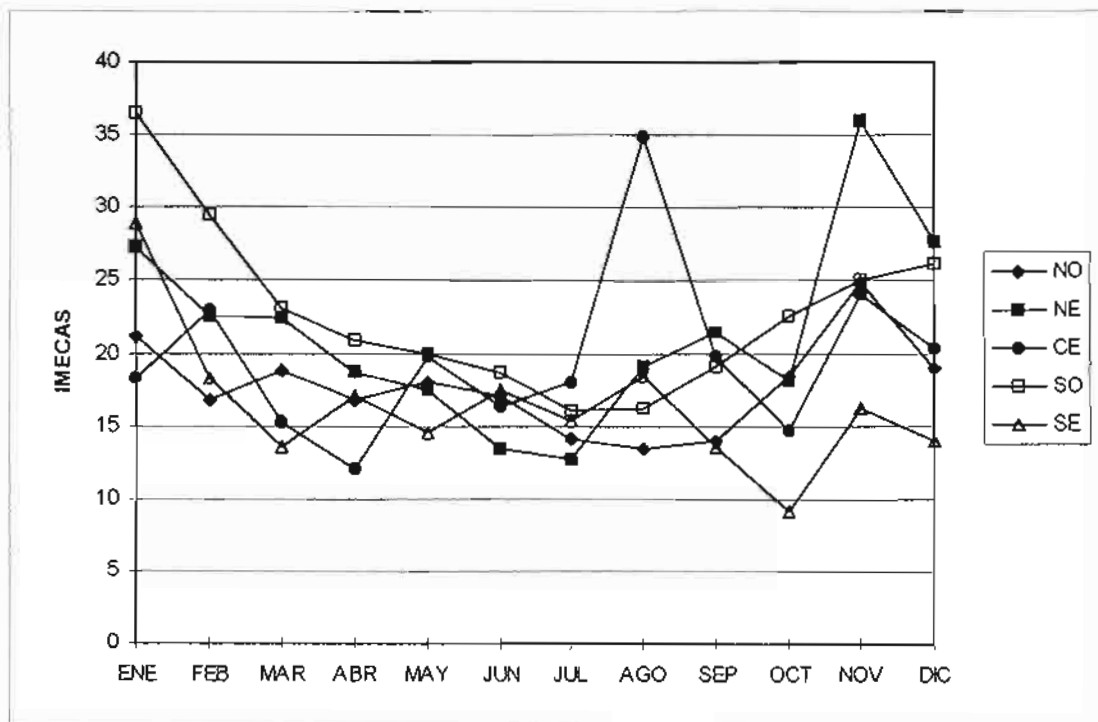


Figura 6. Concentración media del SO<sub>2</sub> en 1996.

concentración se obtuvo en diciembre en la zona suroeste con 36,544 IMECAS, mientras que la menor está en la zona sureste en octubre con 9,170 IMECAS.

La tendencia general de este contaminante para el año 1996 ha sido en aumento, ya que en 1994, inició entre los 15 a 20 IMECAS y al finalizar 1996 se encuentra entre los 25 a 30 IMECAS, pero con muchas irregularidades en este período.

La OMS recomienda un límite de exposición máxima de bióxido de azufre de 0.07 ppm en 24 horas. Este valor máximo equivale a 42.8 IMECAS, mismo que observado en las figuras no fue rebasado de 1994 a 1996 (6).

### 3. ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)

En las Figuras 7 a 9 se presentan las concentraciones del NO<sub>2</sub> reportadas para la ZMVM durante el periodo 1994 a 1996 y son:

De enero a abril de 1994, (Figura 7), se observa una disminución excepto para la zona centro y noroeste. De junio a septiembre se

mantiene estable y hacia el final del tercer cuatrimestre, se eleva quedando en un promedio similar al de enero. El valor anual máximo es de 41,811 IMECAS para la zona centro en el mes de abril y el menor es para el noreste en agosto con 14,970 IMECAS.

Durante 1995 (Figura 8), se presentó un comportamiento diferente al del año anterior, en las concentraciones del NO<sub>2</sub> con un patrón de disminución hasta el mes de septiembre donde se observa incremento del promedio del registro. En diciembre alcanza el mayor valor de 37,222 IMECAS en la zona centro, mientras el mínimo corresponde a la zona noreste en el mes de septiembre con 10,973 IMECAS.

Para 1996 (Figura 9), el comportamiento es semejante a 1995, pero el aumento en la concentración de este contaminante, se da a partir de agosto. El mayor valor se da en enero en la zona centro con 44,535 IMECAS y el menor para la zona noreste en el mes de agosto con 12,486 IMECAS.

El NO<sub>2</sub> durante este período ha tenido una tendencia constante con irregularidades importantes, siendo el período de invierno, de

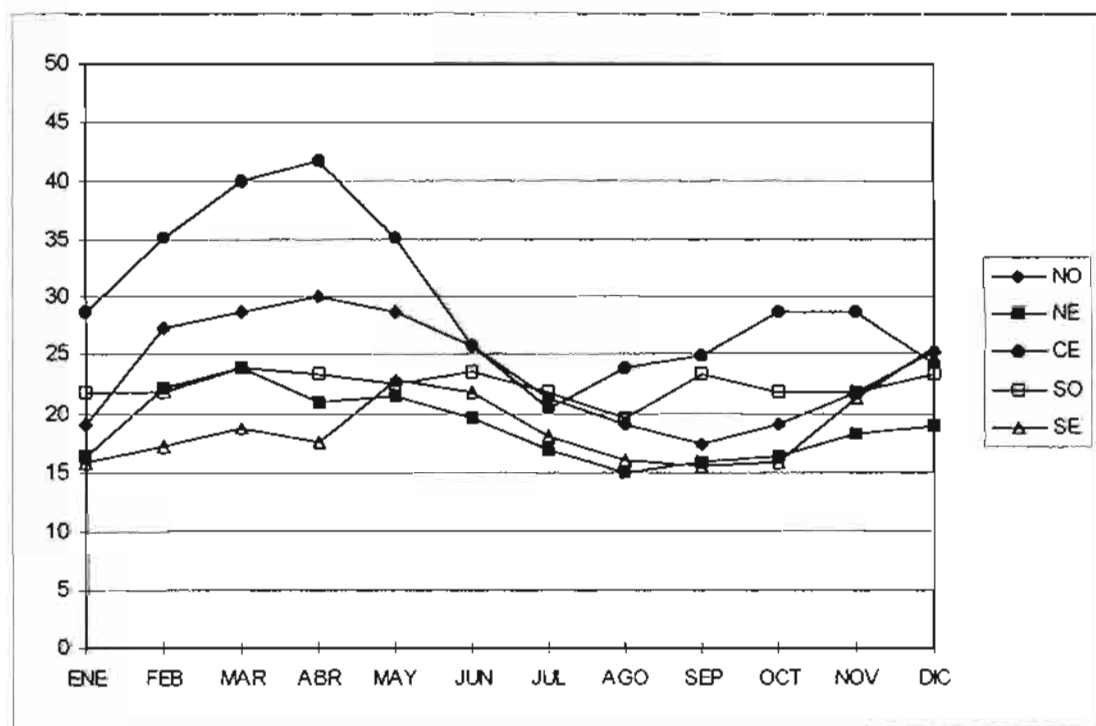


Figura 7. Concentración media del NO<sub>2</sub> en 1994.



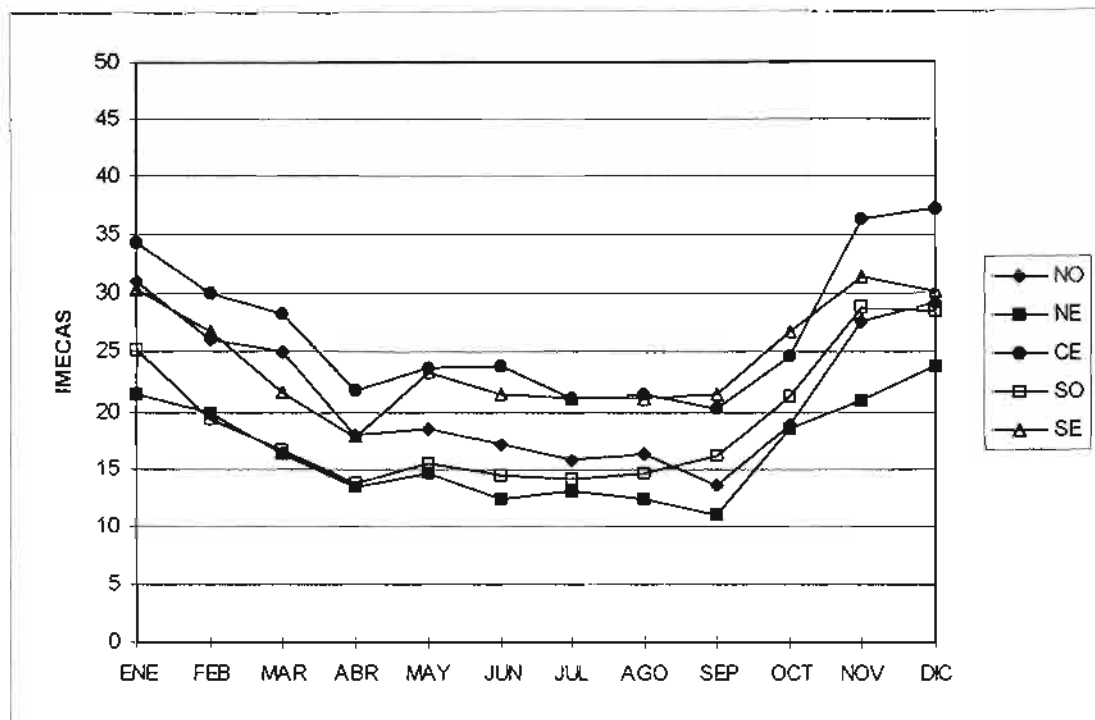


Figura 8. Concentración media del NO<sub>2</sub> en 1995.

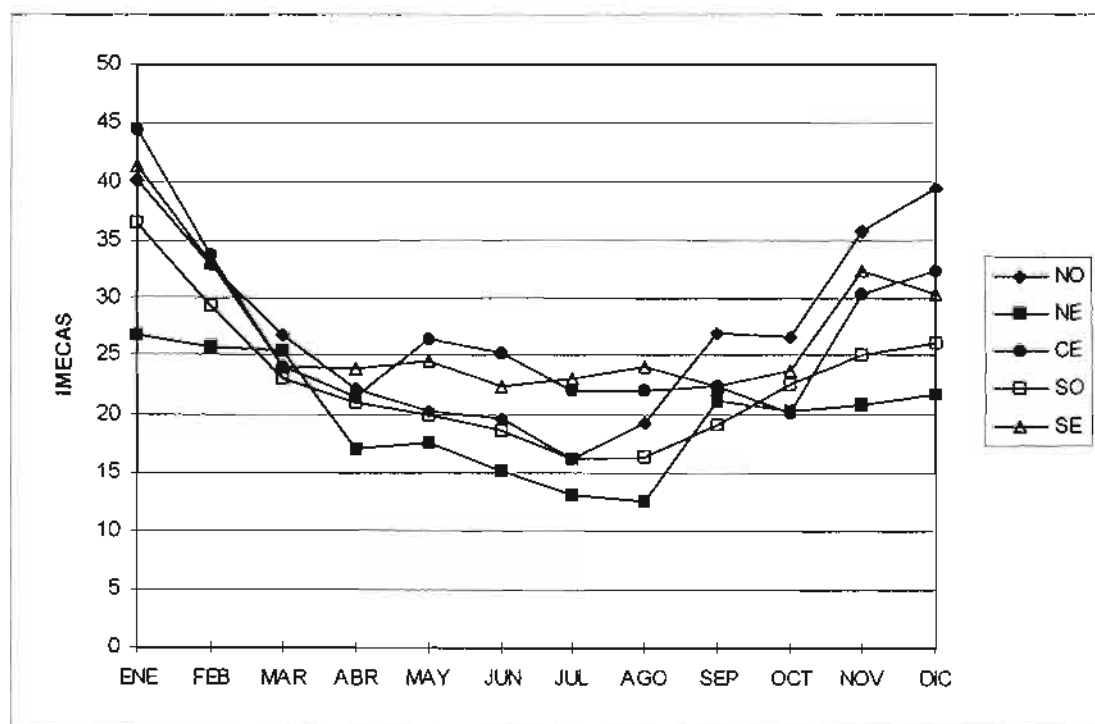


Figura 9. Concentración media del NO<sub>2</sub> en 1996.

1995 y 1996, donde se presentan los mayores valores.

La OMS recomienda un límite de exposición máxima de bióxido de nitrógeno de 0.17 ppm en 1 hora. Este valor máximo equivale a 42.5 IMECAS, mismo que si se observan las figuras 7 a 9 sólo se sobrepasó en el primer cuatrimestre y el último de 1996. Existen horas picos en donde se rebasa este límite, llegando a casi el doble, por lo que debe vigilarse este contaminante en los lugares de mayor afluencia de motores en movimiento (6).

#### 4. MONÓXIDO DE CARBONO (CO).

En las Figuras 10 a 12 se presentan las concentraciones del CO reportadas para la ZMVM durante el periodo 1994 a 1996:

En el año 1994, (Figura 10), se observó un comportamiento estable y semejante para las cinco zonas. Su valor máximo fue en el mes de diciembre en la zona centro con 35.396 IMECAS y el menor es para la zona noroeste en el mes de julio con 16.555 IMECAS.

Para 1995, (figura 11), hay un ligero descenso de los valores en el transcurso del año, en los meses de abril, mayo y junio, para incrementarse nuevamente. El mayor valor fue en la zona noroeste en el mes de enero con 59.665 y el menor para la suroeste con 15.852 IMECAS en el mes de octubre.

Durante 1996, (Figura 12), los primeros meses presentaron valores altos, disminuyendo en el transcurso del año para terminar con registros más elevados pero, no como los iniciales. Aquí, hubo una irregularidad para la zona centro en el mes de agosto, presentándose el valor máximo con 58.953 IMECAS, siendo la más baja, la zona suroeste con 17.382 IMECAS en el mes de abril.

La tendencia general de este contaminante durante este período de tiempo fue similar para los años 1995 y 1996, mientras que los valores más bajos se presentaron en el año 1994.

La OMS recomienda un límite de exposición máxima de CO de 9 ppm en 8 horas (dato modificado hace unos meses en México, en base a las investigaciones de la USEPA en Washington). Este valor máximo equivale a

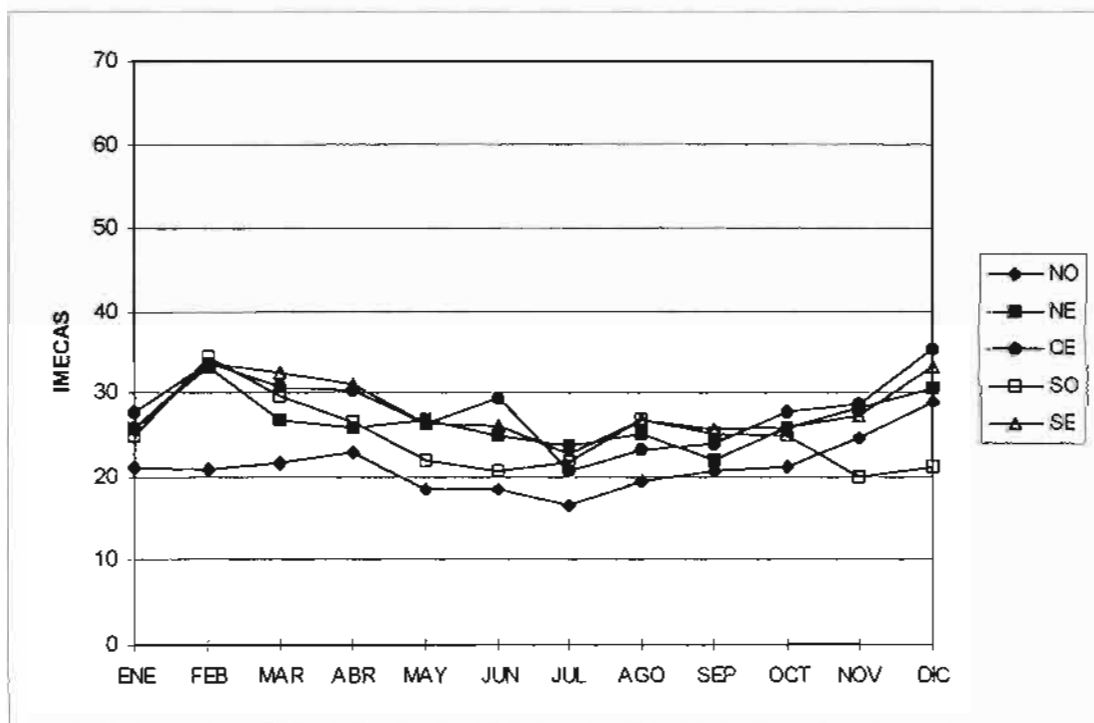


Figura 10. Concentración media del CO en 1994.

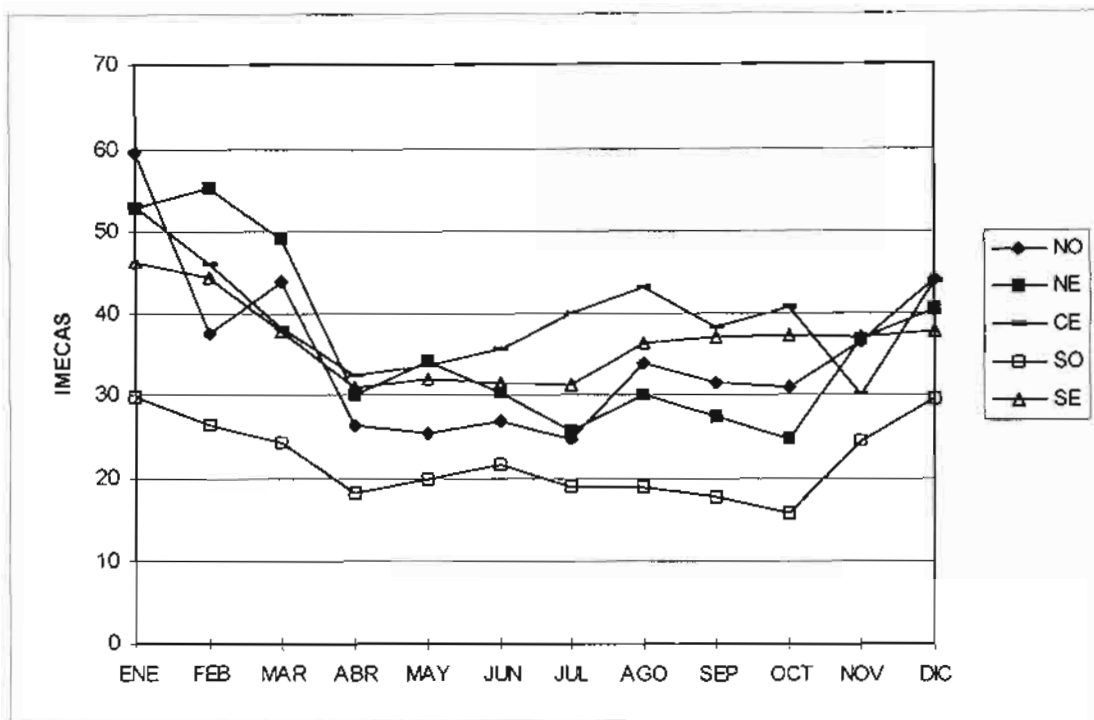


Figura 11. Concentración media del CO en 1995.

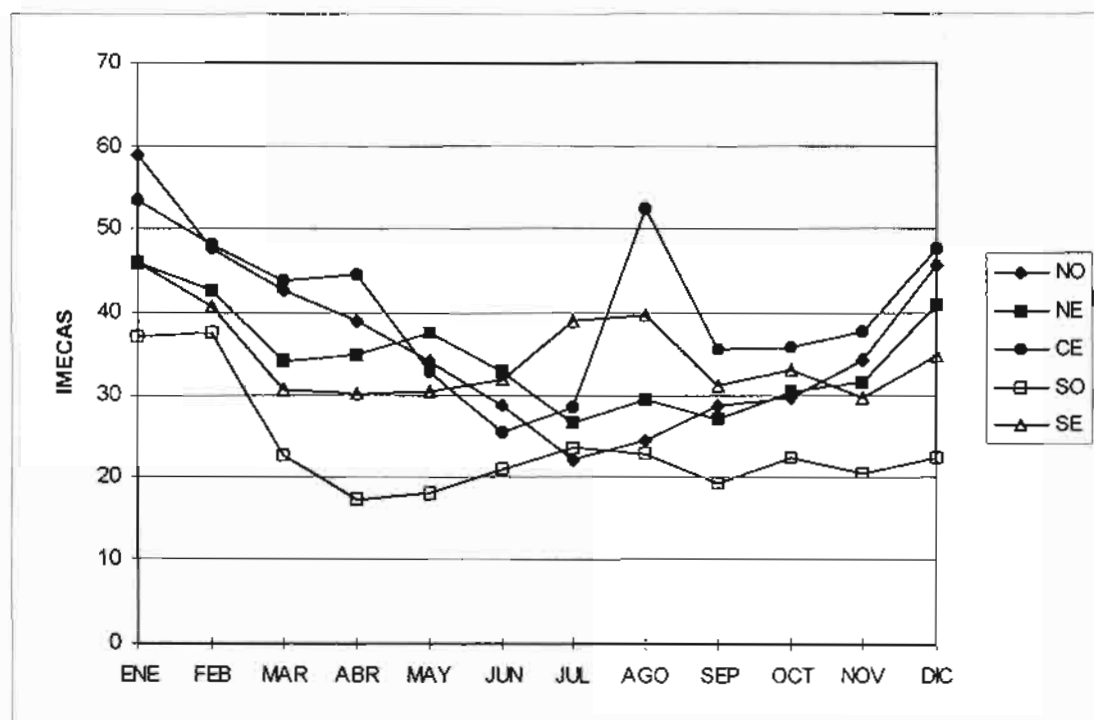


Figura 12. Concentración media del CO en 1996.

46.75 IMECAS, mismo que si se observan en las Figuras 10 a 12 es rebasado en la zona noroeste y noreste en 1995 y para 1996, en la zona centro y noroeste (3, 6).

#### 5. PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES MENORES A $10\mu$ DE DIÁMETRO (PM10)

Durante el año de 1994 no se logró la obtención de datos, por parte del organismo encargado del monitoreo ambiental -la RAMA- en la Ciudad de México.

En las Figuras 13 y 14 se presentan los promedios de las partículas suspendidas totales menores a  $10\mu$  de diámetro reportadas para la ZMVM durante 1995 y 1996:

En esta gráfica (Figura 13), las PM10 presentan gran variación, disminuyen en el mes de febrero y se elevan en los tres meses siguientes, para descender nuevamente e incrementarse poco hacia el final del año, excepto en la zona noreste con tendencia de aumento hasta obtener el mayor valor en diciembre con 98.385 IMECAS. El registro más bajo se presentó en la zona centro en el mes de julio con 22.551 IMECAS.

En cambio, para 1996 (Figura 14), la gráfica fue algo similar pero con cambios no pronunciados. Todas las zonas tuvieron un patrón similar con el mayor valor en la zona noreste en el mes de enero con 122.394 IMECAS y el menor para la zona centro en septiembre con 25.744 IMECAS.

La tendencia general de las PM10 durante estos dos años es de decremento, en especial el último año en forma precisa, aunque los valores más bajos se dan en el año 1995 y los más altos en 1996. El descenso de este contaminante corresponde a la época de lluvias.

La OMS recomienda un límite de exposición máxima de partículas suspendidas menores a 10 micras de diámetro de  $150 \text{ mg/m}^3$  en 24 horas. Este valor máximo equivale a 42.8 IMECAS, mismo que si se observan las Figuras 13 y 14 se ha rebasado en la mayoría de los meses, disminuyendo en pequeña proporción (6).

#### CONCLUSIONES Y PROPUESTAS

Estos datos reflejan que las concentraciones de  $\text{SO}_2$  se mantuvieron en estos tres años, dentro de los límites permitidos o recomendados, lo que indica que las medidas correspondientes para el control de este contaminante han dado resultados favorables.

Por su parte han rebasado los valores máximos recomendables, pero en menor proporción el  $\text{NO}_2$ , especialmente en la zona centro y el CO para 1995 y 1996, en particular para los tres primeros meses.

Fueron el ozono y las partículas suspendidas los principales problemas de contaminación sobrepasando la norma recomendable la mayor parte de cada año, lo cual exige la aplicación de medidas eficaces para favorecer una adecuada calidad del aire en la ZMVM.

Actualmente, la sociedad metropolitana exige el abatimiento de la contaminación atmosférica en el Valle de México, sobre todo por la difusión de nueva información relativa a los efectos nocivos en la salud de la población y que son generados por los niveles alcanzados por algunos contaminantes. La calidad del aire ha sido tema de controversia, pues las instituciones gubernamentales afirman, que sus propuestas y resultados han sido satisfactorias; mientras que la población en general, ha hecho sentir su malestar con respecto a la degradación del aire capitalino.

Para poder mantener el funcionamiento y crecimiento de la ZMVM es necesario que no se siga deteriorando la calidad del aire implementando acciones eficaces y complementarias que produzcan beneficios claros y permanentes.

Mejorar la calidad del aire que respiramos es uno de los desafíos que más convoca el interés y la preocupación de quienes habitamos en la ZMVM. Éste no es un reto sencillo, ya que los problemas de contaminación atmosférica que afectan dicha calidad son el reflejo de profundas implicaciones estructurales, funcionales y territoriales, vinculadas con la forma en que usamos y manejamos la cuenca atmosférica en donde se ubica nuestra urbe.

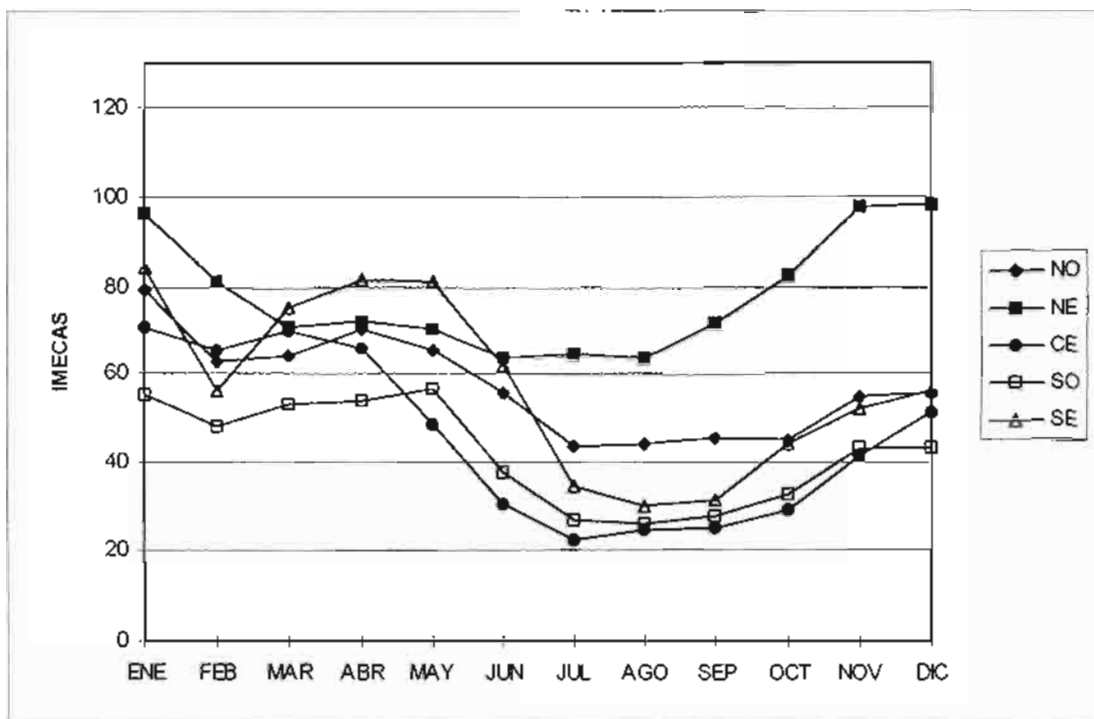


Figura 13. Concentración media de las PM10 en 1995.

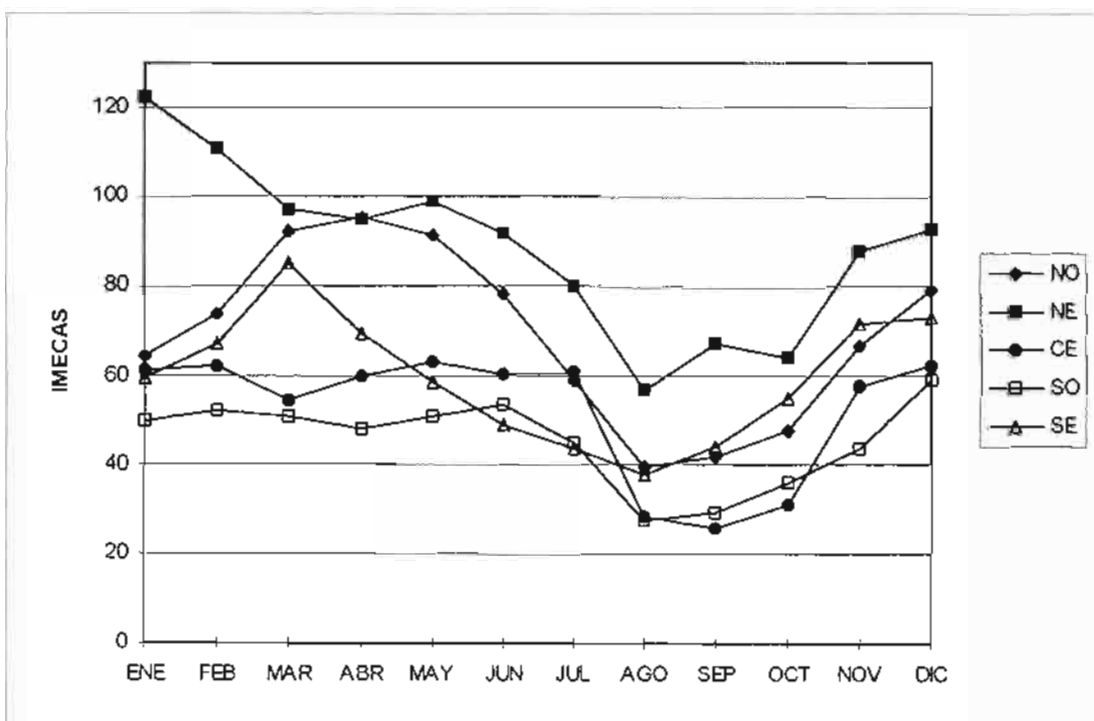


Figura 14. Concentración media de las PM10 en 1996.



Las soluciones de fondo empiezan por un cambio cultural, gradual pero progresivo que modifique la relación con la ciudad y medio ambiente. Y esto involucra la búsqueda de:

1. Una Industria limpia que: necesita mejoras e incorporación de nuevas tecnologías para reducir las emisiones contaminantes.
2. Vehículos limpios: mejorar e incorporar nuevas tecnologías en los vehículos y energéticos.
3. Transporte público eficiente y limpio.
4. Adoptar un programa de "un día sin auto" por familia, para que la contaminación disminuya, convenciendo a la ciudadanía a través de apoyos económicos, por ejemplo: deducción de impuestos.
5. Utilizar transporte escolar y público en aquellas zonas más conflictivas de la Ciudad de México.
6. En el Centro Histórico, retirar en lo posible el movimiento automovilístico, para mantenerlo y darle una apariencia digna.

Todo esto con apoyo o incentivos económicos por parte del gobierno para que participe la inversión privada y extranjera. Y no olvidar que con ayuda de todos podremos lograr mucho.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo desean agradecer a: Dra. Araceli Sánchez del Corral, Directora del Centro de Investigación de la Universidad La Salle por su asesoría. Al personal de la RAMA del D.D.F. y al Ing. José Luis Pedroza, Director de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico del Departamento del Distrito Federal por la aportación de los datos y a la Oficina Regional para América Latina del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), en la Ciudad de México por la información impartida.

#### REFERENCIAS

1. World Resources (1996-1997), *A Guide to the Global Environment; the Urban Environment*, U.S.A., Ed. Oxford University Press, 1996, pp. 20-22.
2. The World Bank, *World Development Report 1992: Development and the Environment*, U.S.A., Ed. The World Bank, 1992, pp. 50-52.
3. Departamento del Distrito Federal, *et al.*, *Programa para mejorar la calidad de aire en el Valle de México 1995-2000*, México, Ed. Departamento del Distrito Federal, 1994, pp. 9-66.
4. Atmospheric Research and Information Centre (ARIC) (Internet), <http://www.doc.mmu.ac.uk/aric/arichome.html>
5. Esta información se obtuvo de los resultados presentados por los científicos Ronald Blake y Sherwood Rowland de la Universidad de California en Irvine en el Congreso celebrado por la Asociación Norteamericana de Química en abril de 1995 en Anaheim California.
6. Rev. Centro Inv. ULSA (Méx.) 1(3): 41-59, 1994.
7. Se comprobó en dos estudios extensos realizados por la USEPA en las ciudades de Denver y Washington, D.C.



## MANEJO INTEGRAL DEL AGUA EN LA ZMVM<sup>1</sup>

Ma. del Consuelo Carranza  
Centro de Investigación, Universidad La Salle

### RESUMEN

La relación entre el hombre y los recursos naturales a través de la historia ha sufrido cambios que en la mayoría de los casos tienden a la desaparición de lo que desde el principio de los tiempos ha acompañado al individuo.

El agua en concreto juega un papel fundamental en la vida del ser humano. Sin embargo, tal importancia la ha vuelto vulnerable al acelerado agotamiento. A raíz de lo anterior, se siguen problemas como la necesidad de suministro a una población tan grande como la de la Ciudad de México, y la calidad del agua amenazada por residuos altamente peligrosos, entre otros.

El presente trabajo pretende dar una visión amplia del tema con apartados como: la perspectiva histórica acerca del suministro, la evolución poblacional, el sistema de abastecimiento, el alcantarillado, el tratamiento y rehuso, la calidad de la misma, la demanda y el manejo del recurso, el marco jurídico, las perspectivas del agua y el manejo integral del recurso en el siglo XXI.

### ABSTRACT

The relation between man and natural resources had changed along history into losing what in the beginning of times had accompanied individuals. Specifically, water has a fundamental role in human life. Because of this, it has become vulnerable to an accelerated drain. Therefore, this states the problems of supplying water to a population as big as the one from Mexico City, and also the quality of the water being treated by highly dangerous residuals.

The current work tries to give a detailed vision about this problem, with sections like: the historical perspective about its supply sources, the poblational evolution, the supply system, the water draining, the recycling process, its quality, its demand and the management of this resource, its legal context, and its perspectives around the twenty first century.

## I. EL VALLE DE MÉXICO.

### El Valle de México.

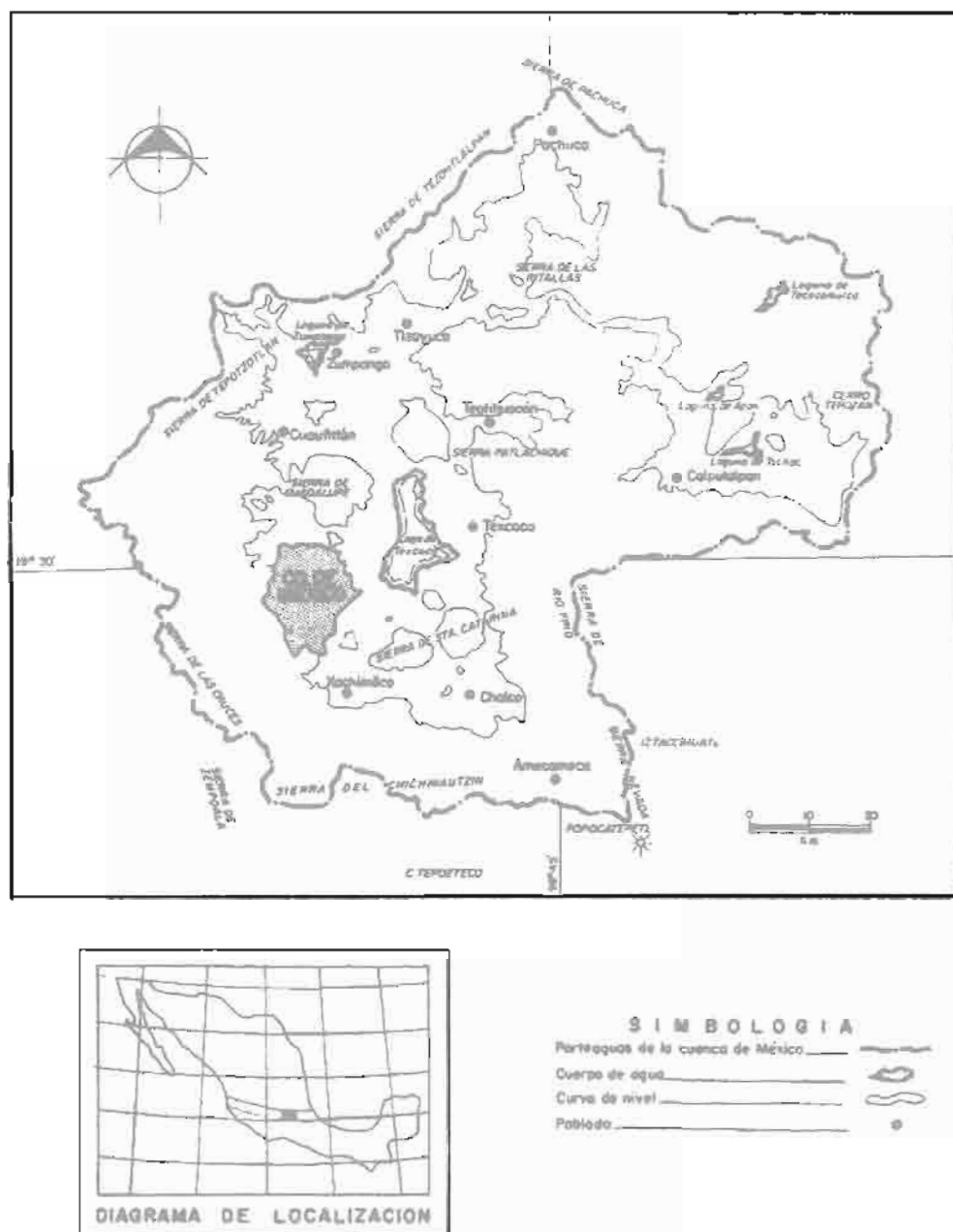
La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) ocupa la parte inferior de la cuenca de México (Figura 1), habiendo evidencias de la presencia del hombre en la misma desde hace más de 25,000 años y de asentamientos humanos establecidos desde 5,000 años a.C. (1) La existencia de condiciones climatológicas propicias, la abundancia de manantiales de

agua dulce y la generosidad en piezas de caza, pesca y aves acuáticas, hicieron del Valle de México un hábitat atractivo para los primeros pobladores.

### Situación geográfica.

El Valle de México consiste de una llanura lacustre plana en la que pueden distinguirse: el lecho de los antiguos lagos, el área montañosa y una zona de piamonte entre estas últimas. El lecho se encuentra formado por estratos

<sup>1</sup> Trabajo presentado en el III Congreso Interamericano sobre Medio Ambiente en San José, Costa Rica, del 13 al 15 de Noviembre de 1996.



**Figura 1. La Cuenca del Valle de México y su Localización.** Fuente: Consejo Nacional de Investigación, *op. cit.*, p. 64.

arcillosos poco permeables y muy compresibles. En las formaciones montañosas sobresalen, en el extremo suroriental de la cuenca, los volcanes: Popocatepetl e Iztaccihuatl alcanzando los 5,465 y 5,230 metros sobre el nivel del mar, respectivamente; al suroeste se encuentra el Ajusco alcanzando los 3,937 metros sobre el nivel del mar. Las

laderas de las montañas y extensas áreas de las zonas de transición estuvieron cubiertas por pinos; sin embargo, factores como la tala inmoderada y la erosión han dado lugar a graves problemas de deforestación, los cuales han modificado considerablemente las condiciones climatológicas de la zona y provocado, en gran medida, los consabidos



problemas de severa contaminación atmosférica.

### Clima.

El clima puede clasificarse del tipo subtropical de altura, templado, semiseco, con temperatura promedio de 20° C y una precipitación pluvial anual de 700 mm (mayo a octubre) irregularmente distribuida; aunado esto último a la frecuente ocurrencia de lluvias torrenciales, dificulta el control de escurrimientos y su aprovechamiento en la recarga de las fuentes de agua subterránea (Figura 2). El potencial anual de evapotranspiración es de aproximadamente 1,400 mm.

### Extensión territorial.

La ZMVM está conformada, para los fines de este estudio, por las 16 delegaciones políticas del Distrito Federal y 17 municipios conurbados del Estado de México, con una superficie de aproximadamente 3,773 km<sup>2</sup>. Es importante señalar que algunos autores, en función de los propósitos seguidos por sus estudios, incluyen en la ZMVM las 16 delegaciones del Distrito Federal, 27 municipios conurbados del Estado de México y uno del estado de Hidalgo con un área global de poco más de 4.720 km<sup>2</sup>.

### Población.

Los asentamientos humanos a principios de nuestra era alcanzaron, primordialmente en Teotihuacán, los 60,000 habitantes (Figura 3), siendo estimados en el tiempo de la Conquista (1521) en 1'000,000 de habitantes, de los cuales aproximadamente 250,000 vivían en la Gran México-Tenochtitlán. Durante los 400 años comprendidos entre la ocupación española y el primer siglo del México independiente la población de la Ciudad de México creció modestamente hasta alcanzar nuevamente el nivel precortesiano. Es a partir de la consolidación de la Revolución Mexicana (1920) que el crecimiento de la ciudad se acelera exponencialmente: de contar con 400 mil habitantes en 1910, suma 18.5 millones de personas en 1995; en una superficie de 3,773

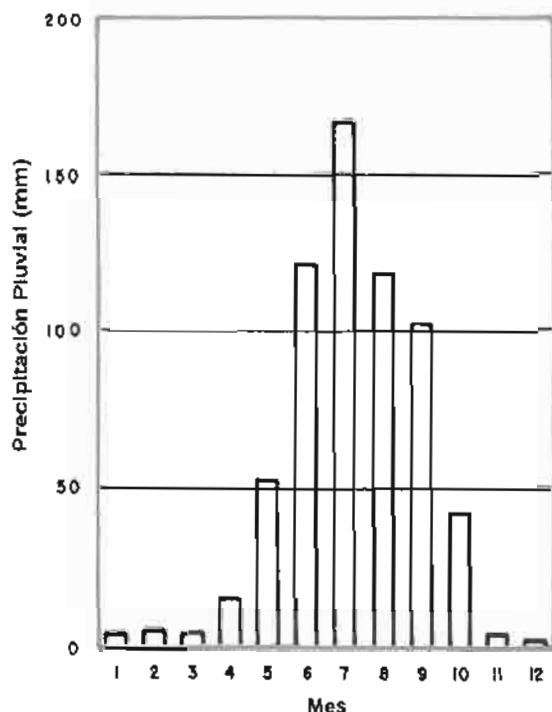


Figura 2. Distribución Mensual de la Lluvia, Fuente: Consejo Nacional de Investigación, *op. cit.*, p. 69.

km<sup>2</sup> la densidad demográfica ha pasado de 782 hab/km<sup>2</sup> a 4,903 hab/km<sup>2</sup> al cabo de 75 años.

Es importante resaltar el alto consumo de agua por parte de la civilización azteca: las ropas, los pisos, calles y calzadas se lavaban regularmente, el gusto por las flores y plantas ornamentales consumía grandes cantidades de agua dulce, y el baño diario era una práctica común cuya falta de cumplimiento constituía un causal de divorcio (2).

### Manejo histórico del recurso.

Los primeros asentamientos en la cuenca de México se ubicaron aledaños a los abundantes manantiales ampliamente distribuidos en el valle y áreas montañosas. El uso de manantiales como fuentes de agua dulce continuó durante la ocupación española hasta la época independiente, y no fue sino hasta los albores del presente siglo que su importancia como fuente de suministro decayó, debido

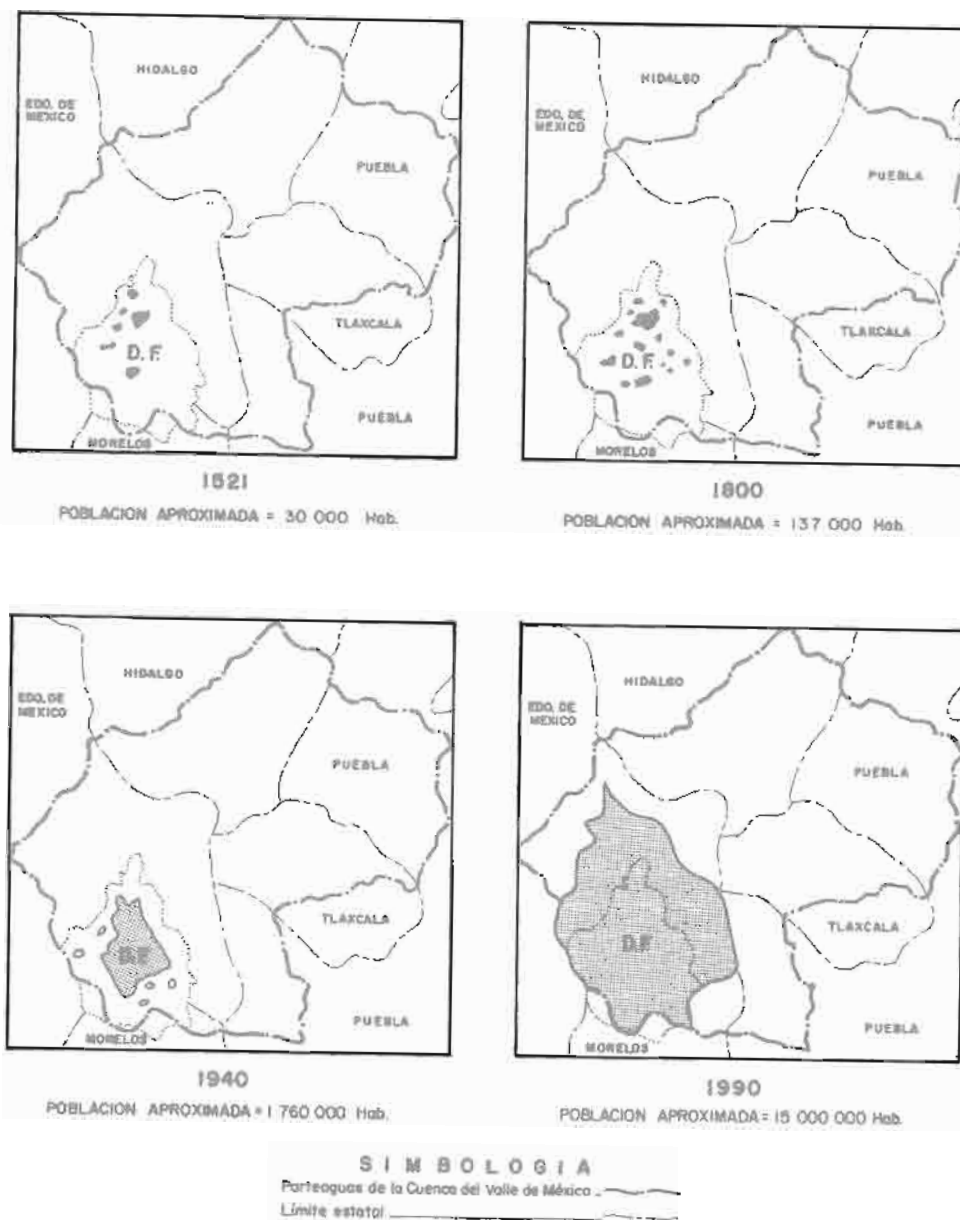


Figura 3. Crecimiento de la ZMVM. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, *op. cit.*, p. 98.

principalmente al uso de agua subterránea. Tanto la construcción de canales para drenar el Valle de México como la extracción de agua subterránea dio lugar a que la mayoría de los manantiales cesara de fluir. Finalmente, en 1953 se comenzó con la importación de agua desde cuencas vecinas.

## II. SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO, ALCANTARILLADO, TRATAMIENTO Y REUSO.

### Antecedentes.

La cuenca de México es originalmente un graben cerrado hidrológicamente y cubierto por

un sistema de lagos. Los manantiales de aguas potables y termales abundaron en el valle y sus márgenes. El suelo y las pendientes bajas de las montañas fueron zonas de descarga del agua subterránea, teniendo lugar la recarga en las rocas volcánicas de las zona montañosas. Al ser el valle una cuenca cerrada, la única salida del agua era por evaporación y transpiración, por lo que las sales se acumularon en las arcillas y los lagos, particularmente en el de Texcoco.

Las diversas civilizaciones que florecieron en el Valle de México contaban con manantiales abundantes, surtiéndose exclusivamente de ellos mediante acueductos como los de: Atexcoac, Coyoacán y Chapultepec. Esta práctica prevaleció aún después de la conquista (Epazoyuca, Otumba y Arcos del Sitio) y hasta antes de la Independencia. Análogamente, el principal problema relacionado con el agua lo constituían las inundaciones. Entre las obras realizadas contra las inundaciones, destacan la construcción de un dique de 16 km al oeste de Tenochtitlán en 1450 y el Tajo de Nochistongo en 1607, cuya operación funcional no fue sino hasta 1767 en que se lograron evacuar las aguas del río Cuautitlán, siendo ésta la primera salida artificial para las aguas del valle. En 1900 se inauguraron el Gran Canal del Drenaje y el túnel de Tequixquiac, construyéndose en 1940 el segundo túnel de Tequixquiac.

La inducción de grandes hundimientos en el suelo ocasionados por la consolidación de las arcillas que recubren el valle se produce por la explotación de los acuíferos, iniciada a mediados del siglo pasado e incrementada en el actual, y la desecación del valle que ha sido continua desde principios del periodo colonial y agudizada con obras como el segundo túnel de Tequixquiac. El funcionamiento del Gran Canal del Desagüe se vio afectado por reducciones en su pendiente, de 19 cm/km a 0 cm/km en el periodo comprendido entre 1910 y 1980. Esta problemática, aunada a la presencia de inundaciones, dieron lugar a la construcción del Sistema de Drenaje Profundo, inaugurado en 1975 con profundidades que varían entre 22 y 217 m, que ha resuelto de manera definitiva, la problemática de las inundaciones en la ZMVM (2).

## Abastecimiento.

La Zona Metropolitana del Valle de México ocupa una superficie total de 3,773 km<sup>2</sup>, sin embargo, el área de servicio de su incumbencia, incluyendo únicamente las áreas urbanizadas en ambas entidades federativas, es de 1,287 km<sup>2</sup>, con una población total de 18.5 millones de habitantes. En la administración del recurso en la ZMVM comparten la responsabilidad el Distrito Federal, el Estado de México y la Comisión Nacional del Agua. Siendo responsables las dos primeras de la provisión de agua potable y de la colección y disposición de las aguas de desecho en su respectiva jurisdicción, por su parte la Comisión Nacional del Agua es la autoridad federal responsable de las cuestiones relativas al agua a nivel nacional, operando dos plantas de suministro de agua potable al área de servicio de la ZMVM: las de la presa Madín y de los Berros.

El acceso al agua potable mediante un sistema de distribución, en relación a la disponibilidad total de vivienda, corresponde al 97% de la población del Distrito Federal, el restante 3% debe proveerse mediante camiones cisterna o bien, autoabastecerse. En el Estado de México el sistema distributivo atiende al 90.5% de la población dentro del área de servicio, en tanto que el 9.5% de la misma debe atenderse a camiones cisterna o algún otro medio. En total, un 94.2% de la población de la ZMVM, aproximadamente 17.4 millones de habitantes, tienen acceso a un sistema de distribución de agua potable (3).

En el área de servicio del Distrito Federal se estima un consumo de agua de 364 l/cap día, mientras en el Estado de México es de 230 l/cap día. El consumo depende primordialmente del ingreso familiar y del tipo de vivienda, de manera que su distribución y/o consumo es desigual. Como mera comparación, en Estados Unidos el consumo varía de 250 a 1,120, promediando 660 l/cap día (5). La diferencia actual en el consumo de agua per capita entre las áreas de servicio en ambas entidades federativas versa en sentido del mayor desarrollo y actividad comercial e industrial del Distrito Federal. El consumo de agua potable en función de su uso representa para uso doméstico el 67% del total del Distrito Federal y el 80% para el Estado de México en el mismo rubro, en lo que se refiere al aprovechamiento

industrial, en ambos casos se estima un 17% del consumo total, mientras que en lo referente a giros comerciales y servicios urbanos corresponde al 16% y 3% del consumo total, respectivamente para las áreas de servicio del Distrito Federal y el Estado de México (3).

El abastecimiento de agua potable para las áreas de servicio tanto en el Distrito Federal como en el Estado de México utiliza agua superficial y subterránea. En lo que se refiere a pozos de extracción, en el Distrito Federal existen 847 en servicio, contribuyendo con 22.7 m<sup>3</sup>/s, en el estado de México hay 242, que producen aproximadamente 20.3 m<sup>3</sup>/s; posteriormente a la desinfección (cloración hasta un total residual de 2.0 mg/l) esta agua de extracción interna se agrega directamente al sistema de distribución. En ambas entidades se aprovechan manantiales naturales y aguas de deshielo, suministrando 0.5 m<sup>3</sup>/s y 0.2 m<sup>3</sup>/s, respectivamente en el D.F. y Edo. Méx. El Lerma aporta, igualmente, agua subterránea en el orden de 4.3 m<sup>3</sup>/s para el Distrito Federal y 1.0 m<sup>3</sup>/s para el Estado de México. El principal aporte de agua superficial lo constituye el Sistema Cutzamala (cuenca Cutzamala-Lerma-Santiago), recorriendo una distancia de 127 km y elevando 1,200 m el recurso sobre su nivel original, con una tasa volumétrica de flujo de 7.6 m<sup>3</sup>/s para la capital del país y de 3.0 m<sup>3</sup>/s para los municipios mexiquenses. El resto de las aportaciones superficiales lo complementan en el área de servicio del Distrito Federal el río Magdalena y para el estado de México la presa

Madín con 0.2 y 0.5 m<sup>3</sup>/s respectivamente. El agua suministrada al área de servicio del Distrito Federal es de 35.3 m<sup>3</sup>/s, y al Estado de México de 25.0 m<sup>3</sup>/s, totalizando 60.3 m<sup>3</sup>/s. De ésta, el agua subterránea representa el 80.1 %, mientras las fuentes superficiales contribuyen con el 18.9 %, correspondiendo a los manantiales el restante 1.0 %. En la Tabla 1 se puede apreciar las fuentes de abastecimiento y el aporte de cada una de ellas para las áreas de servicio de la ZMVM (2).

El agua proveniente del Sistema Cutzamala es purificada en la planta de tratamiento de los Berros, con una capacidad máxima de diseño de 24 m<sup>3</sup>/s, operada por la Comisión Nacional del Agua (CNA). En la presa Madín se localiza otra planta de tratamiento, operada igualmente por la CNA, con una capacidad de diseño de 1.0 m<sup>3</sup>/s. El Distrito Federal cuenta con cuatro plantas de tratamiento para suministro de agua con capacidad total de 1.1 m<sup>3</sup>/s. El total de cloro residual en el agua de suministro tratada es de 2.0 mg/l (2).

El sistema de distribución de agua potable dentro del área de servicio de la Capital de la República consiste en una red primaria de tubería de 690 km de longitud con diámetros entre 0.5 y 1.83 m; y una red secundaria de más de 10,000 km de tubería con diámetros inferiores a 0.5 m. Incluye 243 tanques de almacenamiento con capacidad total de 1.5 millones de m<sup>3</sup> (Figura 4). Para asegurar que el total de cloro residual sea de 0.2 a 0.5 mg/l en

Tabla 1. Fuentes de abastecimiento y aporte de aguas crudas a la ZMVM. (2)

Fuente de agua.	Distrito Federal.	Estado de México.	Total.
Agua subterránea.	27.0 m <sup>3</sup> /s.	21.3 m <sup>3</sup> /s.	48.3 m <sup>3</sup> /s.
• Valle de México.	22.7 m <sup>3</sup> /s.	20.3 m <sup>3</sup> /s.	
• Lerma.	4.3 m <sup>3</sup> /s.	1.0 m <sup>3</sup> /s.	
Agua superficial.	8.3 m <sup>3</sup> /s.	3.7 m <sup>3</sup> /s.	12.0 m <sup>3</sup> /s.
• Cutzamala.	7.6 m <sup>3</sup> /s.	3.0 m <sup>3</sup> /s.	
• Río Magdalena.	0.2 m <sup>3</sup> /s.	---	
• Presa Madín.	---	0.5 m <sup>3</sup> /s.	
• Manantiales.	0.5 m <sup>3</sup> /s.	0.1 m <sup>3</sup> /s.	
• Agua de deshielo.	---	0.1 m <sup>3</sup> /s.	
Abastecimiento Total.	35.5 m <sup>3</sup> /s.	25.0 m <sup>3</sup> /s.	60.3 m <sup>3</sup> /s.

cualquier punto de consumo, se cuenta con 326 localidades de recioración (6). En el Estado de México para la distribución del Sistema Cutzamala se cuenta con el llamado Macrocircuito de Distribución que consta de 49.1 km de transmisión con tubería cuyo diámetro oscila entre 0.2 y 21.3 m, con una proyecto de ampliación de 46.0 km; incluye un sistema de almacenamiento de seis tanques de 256,000 m<sup>3</sup>/s, cada uno. Además de este sistema, existen en el Estado de México 348 km. de transmisión y 32 tanques de almacenamiento con una capacidad de 440,000

m<sup>3</sup>/s. El agua se distribuye a lo largo de 425.7 km de tubería, de 0.07 a 1.07 m; actualmente se están aumentando 649 km, con una expansión futura por demanda de 118.7 km adicionales (4).

#### Alcantarillado.

Los resultados del Censo de 1995 arrojaron como resultado que el 82.1% de las viviendas de la ZMVM cuentan con servicio de drenaje, 6.1% de ellas cuentan con fosas sépticas, 1.5%



Figura 4. Zonas asociadas a la distribución de agua potable. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, *op. cit.*, p. 101.

cuentan con descarga directa y 9.4% de dichas viviendas, alrededor de 294,000, carecen por completo de drenaje (3). En la ZMVM existe sólo un sistema de recolección de aguas residuales, aunque cada área de servicio tiene su propia red albañal, de una u otra manera todas descargan en los interceptores principales del Sistema General de Drenaje. Son tres los interceptores principales: el Gran

Canal, el Emisor Central y el Emisor Poniente, cumpliendo su función mediante cuatro salidas artificiales, en la parte septentrional del valle. Es decir, todo el sistema drena la cuenca de sur a norte.

El sistema de drenaje opera, primordialmente, para desalojar las aguas municipales de desecho y para controlar las

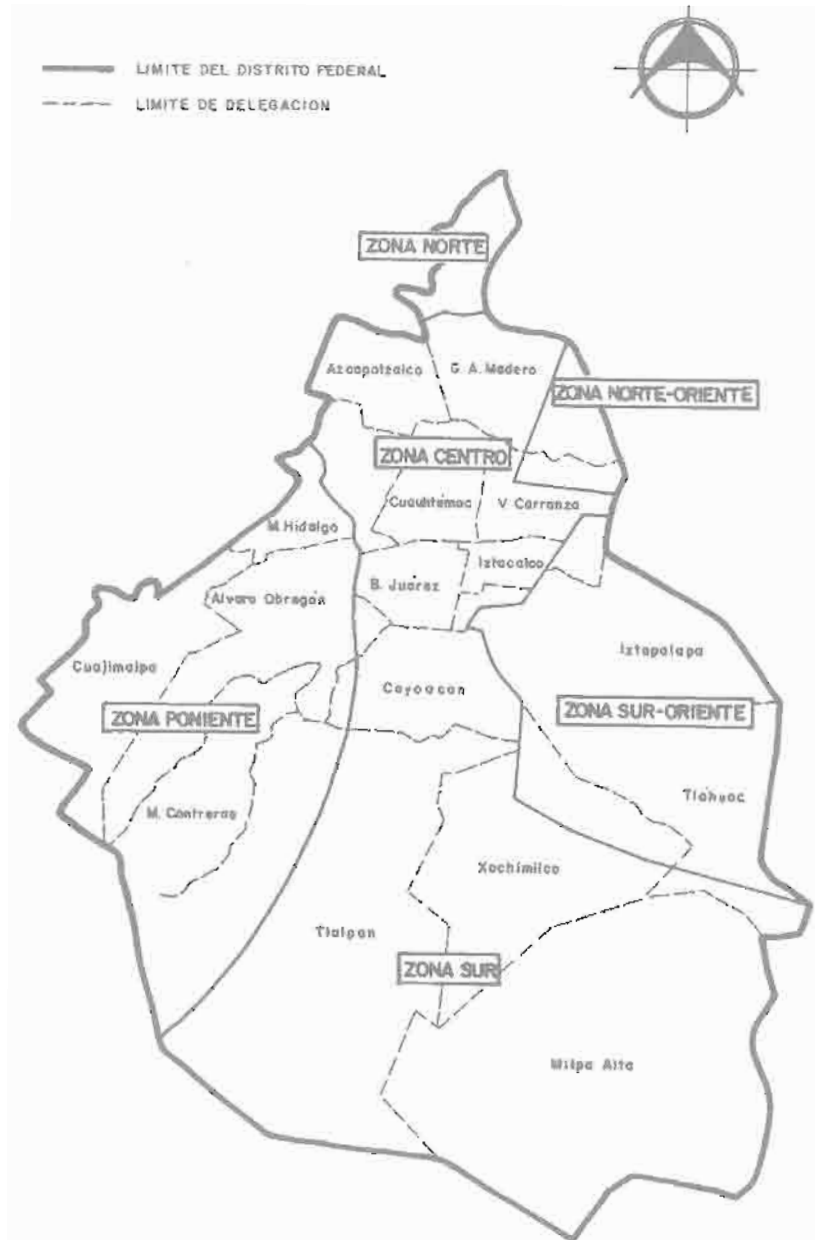


Figura 5. Áreas del sistema de drenaje del Distrito Federal.  
Fuente: Consejo Nacional de Investigación, *op. cit.*, p.110.

inundaciones. Consta de dos redes colectoras: secundaria y primaria, y del Sistema General de Drenaje. La red secundaria colecta aguas residuales domésticas e industriales (municipales) así como pluviales. La red primaria conecta a la secundaria con el Sistema General de Drenaje, que controla el flujo de aguas residuales y pluviales y las transporta fuera del Valle de México (Figura 5). El desarrollo del sistema de desagüe se determinó por la necesidad de controlar y desalojar el agua residual del valle y no para disponer de esta mediante su reuso.

En el Valle de México las temporadas de lluvia y estiaje están perfectamente bien definidas, según la época del año, la operación del Sistema General de Drenaje es diferente: durante la época de lluvias el flujo pluvial es considerablemente mayor que el producido por las descargas domésticas e industriales; sin embargo, la forma en que operan las redes primaria y secundaria no depende de la época del año. En la temporada de estiaje el flujo producido, primordialmente aguas de desecho municipales, se expulsan por el Gran Canal y el Emisor Norte con flujos de aporte aproximados de 28 m<sup>3</sup>/s en el D.F. y 44.4 m<sup>3</sup>/s en el Estado de México. En la época de lluvias la precipitación media anual es de 700 mm, con la presencia de tormentas de alta intensidad y corta duración, de manera que alguna de ellas puede producir del 7 al 10% de la precipitación anual, y que el 50% de este volumen se precipite solamente en 30 minutos. Debido a esto y al patrón geográfico irregular de las tormentas, se proyectó el Sistema General de Drenaje de manera que, durante la temporada de lluvias entra en funcionamiento el Sistema de drenaje Profundo para enfrentar eficazmente los volúmenes pico de la época de lluvias. El Sistema de Drenaje Profundo consta de túneles con profundidades de entre 22 y 217 m de profundidad, con una capacidad máxima de flujo para desfogue de 200 m<sup>3</sup>/s durante 45 horas, transportando el fluido de sur a norte por gravedad (5).

#### Tratamiento y reuso.

En la ZMVM existen 27 plantas de tratamiento para aguas residuales, 13 de las cuales están en servicio en el Distrito Federal y las restantes 14 en el Estado de México, con la finalidad de tratar los afluentes residuales para su reuso, y

una capacidad total de tratamiento de 4.31 m<sup>3</sup>/s, siendo de 2.62 y 1.69 m<sup>3</sup>/s, respectivamente para dichas entidades federativas. Curiosamente, en el Distrito Federal la capacidad operativa de las plantas de tratamiento es tan sólo del 55% de la capacidad instalada y en el Estado de México 7 de ellas operan por debajo de su capacidad instalada. Durante la temporada de estiaje en el Distrito Federal se genera una cantidad aproximada de aguas residuales de 28 m<sup>3</sup>/s de los cuales únicamente el 9% recibe tratamiento para su reuso. En este sentido, el 91% de las aguas residuales generadas en la ciudad más grande del orbe son descargadas a los cuerpos receptores sin tratamiento alguno (2).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales incluyen tratamientos secundarios (lodos activados), desinfección y en algunos casos, procesos de tipo terciario. Las aguas residuales generadas en la ZMVM presentan problemas operativos durante su tratamiento, vinculados con altos contenidos de sólidos totales y disueltos, grasas y aceites, fósforo, nitratos, nitritos y valores de conductividad eléctrica, aunados a bajas remociones de alcalinidad y dureza. De igual manera, el tratamiento y disposición de lodos generados en los mencionados tratamientos constituyen un problema significativo debido a lo cual, en la actualidad se retornan directamente al sistema de alcantarillado.

En el área de servicio del Distrito Federal la distribución por destino de reutilización del afluente de aguas residuales es de 83% para irrigación de áreas verdes, 10% distribuido en actividades industriales, 5% para riego agrícola y 2% para el comercial (6). En lo referente a las aguas tratadas del Estado de México se estima su utilización en actividades industriales, sin embargo, no se cuenta con información fidedigna. Las autoridades del Distrito Federal estiman que el sector industrial, incluidas las plantas manufactureras, utilizan 2.4 m<sup>3</sup>/s principalmente como agua de enfriamiento.

### III. CALIDAD DEL RECURSO Y SALUD PÚBLICA.

La población de la ZMVM, 18.5 millones de habitantes, depende en gran medida de la calidad del recurso proveniente del acuífero local (80% del suministro) por lo cual resalta la

importancia de prevenir los riesgos relativos al deterioro de la calidad del acuífero (subterráneo) y por ende del lo concerniente a la afectación de la salud de los habitantes del Valle de México por la exposición a contaminantes presentes en el agua para consumo humano.

#### Fuentes de contaminación.

Existe una amplia gama de actividades humanas generadoras de cargas contaminantes, agrupándose en dos grandes rubros: urbanas e industriales. Las actividades domésticas representan fuentes potenciales de contaminación por la alta concentración de materia orgánica que contienen sus descargas, la existencia de fosas sépticas en zonas de alta vulnerabilidad y las fuentes potenciales presentes en los sitios de depósito de residuos sólidos.

El 26% de la población asentada en la ZMVM carece de sistemas de drenaje (7), eliminando sus afluentes localmente en arroyos, fosas sépticas y letrinas. La mayoría de estos asentamientos ubicados en la zona de transición representan una fuente potencial de contaminación del acuífero por organismos patógenos y otros contaminantes presentes en las descargas domésticas. De manera similar, las condiciones de los sistemas de tuberías del drenaje no son óptimas, ya sea por la instalación incorrecta o por deterioro o ruptura de los mismos. Algunas vías de desfogue, como el Gran Canal de Desagüe, o el río de los Remedios, son canales no revestidos, y por lo tanto fuentes potenciales de contaminación del agua y del acuífero. El potencial de contaminación subterránea originada en los contaminantes también está presente en la zona lacustre: del Gran Canal se derivan aguas residuales para regar 5,500 ha en las inmediaciones de Chiconautla y del emisor poniente de 5 m<sup>3</sup>/s, para las áreas de Guadalupe y de Zumpango (2). Fuera de la cuenca, parte se utiliza para 80,000 ha de los distritos de riego en Hidalgo, fluyendo hacia el Golfo de México a través del sistema fluvial Tula-Moctezuma-Pánuco.

En el Valle de México, como en los países industrializados, la acumulación de residuos sólidos domésticos e industriales constituyen un problema relevante, particularmente porque la

manera tradicional de disposición final de dichos residuos sólidos consiste en tiraderos a cielo abierto. En algunos casos, después de la selección y la separación manual de los residuos, la basura se compacta y se cubre con arcilla, quedando finalmente el 70% de los residuos sólidos sin reutilizarse. De los tres rellenos sanitarios instalados en la ZMVM ninguno de ellos cumple con las especificaciones requeridas. Se estima que anualmente se generan cerca de 22,000 ton/día de basura, siendo generadas por cada habitante aproximadamente 1,120 g, de los cuales corresponden 850 g a basura domiciliaria (2).

En lo referente a residuos industriales, existen registradas en la ZMVM 30,124 empresas industriales, ubicadas el 72.4% de ellas en el Distrito Federal y el restante 27.6% en el estado de México (7). La clasificación de las empresas industriales en la ZMVM, según su tamaño, corresponde a un 75% de Microindustria, 20% de Pequeña Industria, 3% de Industria mediana y el restante 2% corresponde a Macroindustria. De manera enunciativa, se puede mencionar que de las 242 gasolineras ubicadas en Distrito Federal, en la mitad de las mismas se detectaron y repararon fugas de combustible. En el área restante de la ZMVM no se conoce el avance de la prospección y saneamiento de las zonas contaminadas por hidrocarburos (8).

#### Migración de contaminantes.

Se ha realizado un número importante de estudios relacionados con el transporte de compuestos orgánicos e inorgánicos, enfocados principalmente a la interpretación de datos hidrológicos, al transporte de solutos naturales y al potencial de contaminación en el acuitardo lacustre.

Los desechos tóxicos generados en las 679 plantas de la industria eléctrica-electrónica ubicada en la ZMVM incluyen compuestos orgánicos tóxicos como: benceno, cloruro de metileno, cloruro de vinilo, diclorobenceno, percloroetileno, tolueno y xileno; mismos que son vertidos a los sistemas de drenaje sin tratamiento previo, y constituyen una fuente potencial de contaminación (9). En este sentido, se tomaron muestras de material geológico del acuitardo arcilloso adyacente a



los canales y del área urbana, identificándose rutas potenciales de contaminación en la migración descendente de contaminantes en dichos canales de drenaje sin revestimiento (2). Los resultados del estudio indican que los detergentes aniónicos y ciertos compuestos orgánicos volátiles han penetrado de manera descendente en el acuitardo arcilloso; tanto las concentraciones de detergentes (7.7 µg/l) como las de 1,1-dicloroetileno y tricloroetileno (23.5 µg/l) sobrepasan las normas mexicanas que se establecen en el acuerdo relativo a los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua (CE-CAA-001/89). Aún cuando las concentraciones de contaminantes en el acuitardo son bajas y los compuestos han penetrado una distancia corta, los resultados son significativos, debido a que dichos compuestos han emigrado a una distancia mayor que la predecible para una formación arcillosa homogénea (10).

Los estudios realizados por Pitre en materia del flujo y transformaciones químicas en acuitardo arcilloso fracturado en la confluencia de dos canales de aguas negras que reciben desechos líquido e industriales (Río de los Remedios y Gran Canal de Desagüe), evalúan la presión hidrodinámica, la permeabilidad del acuitardo, analizan en los núcleos el material geológico y su disposición, y determinan igualmente la composición química e isotópica del agua. Documentándose las características siguientes: régimen descendente en el flujo de agua, coeficientes de permeabilidad de 1 nm/s, mineralización de las aguas superficiales menor a las del acuitardo, infiltración de agua posterior a 1962 en los primeros 6 m (trazado de tritio) y concentraciones de metales pesados (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn). Lo que hace suponer cierta capacidad para retardar y/o transformar los metales pesados en los estratos superficiales de los acuitardos (11).

El carácter local de las diversas investigaciones llevadas a cabo en el acuitardo arcilloso no permiten extrapolar los resultados a la zona lacustre, sin embargo, constituye el principio de los estudios que es posible realizar y uno de los más diversos enfoques que se han dado a problemas específicos en la ZMVM.

#### **Evaluación y control de la calidad del agua.**

En la red de distribución existen 326 dispositivos de desinfección del agua potable

mediante la aplicación de hipoclorito de sodio y cloro gaseoso. Para supervisar la calidad de agua de abastecimiento, el Laboratorio Central de la Calidad del Agua del DDF efectúa monitoreos en la red de distribución que abastece al 98% de la población del D.F. En el periodo comprendido entre 1982 y 1993 el porcentaje de cumplimiento de la norma para cloro residual (0.2 mg/l) ha variado de un 79 a un 91% de cumplimiento y en microbiológicos (dos organismos coliformes/100 ml) ha variado de 79 a 96% en el cumplimiento (2).

Algunos de los problemas identificados, en lo que a organismos patógenos en el agua de consumo se refiere, incluyen evaluaciones de la contaminación protozoológica en el agua de registro de los grifos de casa habitación, evidenciando la presencia de parásitos tanto en forma trófica como quística, así como protozoos indicadores de la descomposición de materia orgánica, principalmente flagelados, amibas y ciliados. En otros estudios se describió la presencia de amibas patógenas en aguas con niveles de cloro residual de 0.5 a 1.5 mg/ml, lo que indica la poca eficiencia de la cloración (2).

#### **Vigilancia y certificación sanitaria.**

En la supervisión de la calidad del agua para consumo humano se efectúan monitoreos en la red de distribución que abastece a la población del D.F., se realizan muestreos en cruceros específicos de cada una de las 1,270 colonias de las 16 delegaciones, muestreando 76,968 cruceros. En 1993 se analizaron 46,569 muestras y se realizaron 176,564 lecturas de cloro y 6,304 inspecciones sanitarias, lo que implica sólo una muestra anual por red y seis muestras anuales por sitio de instalaciones hidráulicas. Los niveles de análisis incluyen parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y cromatográficos (2).

En el Estado de México la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS) realiza análisis físicos, químicos y bacteriológicos, inclusive metales pesados, en aguas de abastecimiento municipales y estatales. La realización del muestreo se da dos veces por año, determinando los parámetros organolépticos (aspecto, potencial de hidrógeno, olor, sabor, color y turbiedad), bacteriológicos (coliformes totales y fecales), elementos, iones y



sustancias (alcalinidad, aluminio, arsénico, bario, cadmio, cloruros, cobre, cromo hexavalente, dureza total y de calcio, hierro, fluoruros, magnesio, manganeso, nitratos, plomo, selenio y zinc).

#### **Vulnerabilidad de la salud de los habitantes de la ZMVM.**

La distribución de las enfermedades diarreicas en la ZMVM son indicadoras de: contaminación de agua y alimentos por organismos patógenos, infraestructura sanitaria deficiente, bajo nivel cultural y disposición inadecuada de la excreta humana. Otros riesgos de la contaminación del agua por organismos patógenos incluyen el desarrollo de enfermedades paralíticas, meningitis aséptica, encefalitis, miocardiopatías, infecciones sistemáticas severas en recién nacidos (meningo-encefalo-miocardiasis), síndromes respiratorios, orquitis, hepatitis y otros más, que pueden ser originados por gran diversidad de enterovirus. La mayoría de las infecciones virales de origen hídrico ocurren en niños. La OMS ha detectado, en países en vías de desarrollo, una correlación entre la morbi-mortalidad infantil y la infraestructura sanitaria deficiente (12).

Las tasas de mortalidad y morbilidad por enfermedades diarreicas tiene gran variación geográfica, como reflejo de las condiciones sanitarias y sociales, pero también como resultado de la cobertura de los servicios de salud. Las tasas de morbilidad son más elevadas en la medida que las delegaciones se encuentran más al sureste del D.F. y con menor índice de población como Milpa Alta y Tláhuac que representan el 12% del total de casos registrados. En esta entidad el grupo de edad más afectado para las diarreas es el de menores de un año con incidencia de 17,472 por 100,000 nacidos vivos registrados, representando el 13.2% del total; le sigue el grupo de 1 a 4 años con tasa de 5,898 y un porcentaje de 18.2 del total. El 0.007% de la mortalidad general en el D.F. fue debida a enfermedades diarreicas con tasa de 7 defunciones por cada 100,000 habitantes; siendo en el Estado de México la tasa de 17 defunciones por cada 100,000 habitantes, cifras inferiores al promedio nacional de 21.5 por cada 100,000 habitantes (13).

#### **IV. DEMANDA Y MANEJO DEL RECURSO.**

La gran mayoría de las fuentes de agua en el Valle de México (subterráneas) han sido sobreexplotadas desde principios del presente siglo, lo que ha provocado severos problemas de hundimiento, deterioro de la calidad del agua, acelerada escalada de costos y acceso inequitativo al recurso. En la Ciudad de México se estima por concepto de recaudación un déficit anual de mil millones de dólares, debido al subsidio excesivo que ha generado paralelamente, el consumo excesivo. De igual manera, el acceso de la población de bajos recursos al suministro confiable de agua es inequitativo y limitado. La noción de que el recurso es escaso y su suministro sumamente costoso trasciende tan débilmente, que la mayor parte del consumo se cuantifica de manera poco confiable, o bien, se aplican cuotas fijas por este servicio. En este sentido, el financiamiento insuficiente restringe la capacidad del sistema para expandir la red áreas sub-abastecidas, tratar el agua residual y reparar las fugas del sistema de distribución; por lo tanto, el incremento de la demanda continúa rebasando la provisión sustentable del recurso. En la ZMVM, la problemática relacionada a la demanda y escasez del recurso se origina tanto por el incremento poblacional como por los patrones existentes de subsidio a los usuarios. El costo del agua se incrementa debido a que las fuentes del mismo son más caras, las normas de calidad más elevadas y el mantenimiento y expansión del sistema más demandante.

En la ZMVM los costos reales para satisfacer la demanda ascendente de agua de calidad aceptable son crecientes. Su incremento y el de los servicios de saneamiento, actúan dramáticamente en la elevación de costos a medida que la población urbana continúa en expansión, y la disponibilidad, la calidad y las finanzas del agua se deterioran. Aunado a esto, una porción importante del agua que entra al sistema formal de distribución se pierde por fugas, y la satisfacción de la demanda no es equitativa en las diferentes partes de la región. Finalmente, los sistemas de financiamiento y cobro del agua consumida estimulan el consumo excesivo y fomentan la escasez de fondos para el mantenimiento y expansión del sistema. Buenfil define cinco áreas de oportunidad prioritarias encaminadas a lograr una

administración integral del recurso: Preservación del agua, Recuperación de costos y salud financiera de la empresa, Equidad doméstica y social, Pérdidas e Información (15).

En las áreas de bajos ingresos de la ZMVM se subsidian los costos reales de suministro y desecho. Por ejemplo, en el Distrito Federal se gastan más de \$570 millones de USD al año, para subsidiar los servicios de agua y saneamiento. De las 64 ciudades mexicanas existentes en 1992 con más de 100,000 habitantes, el D.F. ocupa el vigesimoquinto lugar por el monto pecuniario recuperado por cada toma de agua, a razón de ¢10 USD por año, cobrándose únicamente ¢11 USD por m<sup>3</sup>, considerándose el costo marginal de suministro a las comunidades de la ZMVM en aproximadamente \$1.00 dólar por m<sup>3</sup>. En el D.F., las tarifas por metro cúbico para el sector industrial varían en función del consumo, siendo la más baja de ¢20 USD en consumos de hasta 30 m<sup>3</sup>, alcanzando un costo de ¢97 USD por consumos mayores a 960 m<sup>3</sup>. En caso de no contar con medidor, se les aplica una tarifa fija bimestral en función del diámetro de tubería que oscila entre los \$13.50 USD en tuberías menores a 13 mm (½") y los \$107,000.00 USD para tuberías mayores a 300 mm. (12") (2).

## V. MARCO JURÍDICO.

La regulación de la administración del recurso en la ZMVM representa una problemática significativamente compleja, existiendo un gran número de organismos dependientes de varias ramas del gobierno federal y local, así como normas jurídicas aplicables. En el Valle de México, como en el resto del país, se percibe un movimiento tendiente a la privatización de la asignación del agua, emprendiéndose una verdadera revolución en la asignación de los recursos hídricos y en la regulación de su calidad. Por ejemplo, actualmente se incluyen evaluaciones costo-beneficio en el desarrollo, la aplicación de las normas, y la promoción de derechos privados con respecto al recurso.

### Suministro y propiedad del agua.

En México, toda regulación con respecto a los recursos naturales emana del artículo 27

constitucional, en donde se definen como bienes propiedad de la nación. El párrafo quinto clasifica los recursos dentro del país, delimitándolos entre privados y públicos, y clasificando las aguas como: interiores, marinas territoriales sujetas a soberanía mexicana, marinas apropiadas para uso doméstico, superficiales en suelo mexicano, subterráneas en subsuelo mexicano, privadas en terrenos de particulares individuales y privadas en terrenos privados colectivos. Establece, de igual manera que el agua superficial es materia de concesión por el Poder Ejecutivo Federal, para explotación mediante construcción de obras por parte del concesionario.

La administración del recurso incluye distintas instituciones como: la Presidencia de la República, las dependencias del D.F., los organismos de jurisdicción estatal y los consejos regionales de la cuenca. El Presidente de la República tiene el poder para reglamentar la extracción y el uso de las aguas nacionales, establecer áreas de veda y emitir reglas encaminadas a conceder permisos para el usufructo de aquéllas. La Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca tiene el poder para reglamentar los recursos hídricos a través de la Comisión Nacional del Agua, la cual fue creada a iniciativa del Presidente, para efectuar la asignación del agua. La CNA se divide en seis regiones geográficas, una de las cuales está constituida por la ZMVM e incluye al Distrito Federal y parte de los estados de México, Tlaxcala, Hidalgo, Puebla y Morelos. En lo referente al D.F., éste está regulado mediante una legislación federal especial, siendo La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) la encargada de controlar la distribución del agua. En el Estado de México, la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS) es la responsable de la distribución del recurso.

El artículo 27 constitucional establece que la CNA puede otorgar concesiones a entidades privadas para aprovechar las aguas superficiales. Igualmente, de acuerdo con este artículo, se puede asignar agua del subsuelo a entidades privadas o municipios, excepto a aquellos casos en que el ejecutivo ha proscrito la explotación de un acuífero. En lo referente a las aguas residuales, la CNA adopta la posición de que toda agua residual retomada a las de dominio público es de nuevo propiedad de la



nación, sin embargo, existen programas según los cuales las aguas residuales pueden comercializarse.

#### Calidad del agua.

La Ley General del Equilibrio y Protección al Ambiente define la prevención y control del agua y de sistemas hidráulicos, establece criterios selectivos para tal propósito y estimula la participación de la comunidad en ese control. La Ley Nacional del Agua, promulgada en 1992 contiene también estipulaciones relativas a la calidad, estableciendo la obligación de la CNA de promulgar reglamentos encaminados a proteger y mejorar la calidad del agua en sistemas fluviales y en acuíferos, y hacer cumplir los reglamentos en casos de descargas de aguas residuales. La Ley General de Salud establece la autoridad de la Secretaría de Salud para establecer criterios de calidad de agua potable, tratamiento de aguas residuales y reglamenta la estructura de distribución de agua. La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) realiza las tareas encaminadas a hacer cumplir las normas para la protección ambiental. Existen así mismo, una gran cantidad de Normas de carácter nacional relativas a la calidad de agua.

#### Materia tributaria.

La Ley de Impuestos por Consumo y Descarga de Aguas, requiere que la explotación, el uso o el desarrollo de las aguas nacionales superficiales o subterráneas, ya sea para abastecimiento o para recepción de descargas de desecho, pague derechos, según lo previene la Ley Federal de Derechos en Materia de Aguas Nacionales. La ley expresa que asignatarios como los organismos federales, estados, municipios, entes privados o empresas concesionarias, paguen la cantidad especificada en su zona de extracción. Así mismo, obliga a quienes contaminan el agua, a pagar tanto por el hecho de descargarla como por el costo de hacer cumplir la ley, incluyendo además el daño ambiental y las multas derivadas del incumplimiento de las regulaciones en la materia.

## VI. EL AGUA Y LA ZMVM DEL SIGLO XXI.

Los subsidios al servicio de agua han limitado la capacidad del gobierno para ampliar las redes de servicio, purificar el agua, tratar el agua residual y financiar el mantenimiento. Recientemente se han aplicado políticas tendientes a administrar con mayor eficiencia los recursos para el suministro del agua al área metropolitana. Sin embargo, en los albores del siglo XXI, revertir las tendencias del pasado y ejecutar nuevas estrategias de conservación, no será fácil. Para administrar óptimamente el suministro y drenaje del agua en la ZMVM, será necesario combinar en proporciones adecuadas, la necesidad de obtener nuevas fuentes de abastecimiento con una administración más cuidadosa de las ya existentes. A continuación se establecen algunas recomendaciones que proponen lineamientos de políticas generales encaminadas a lograr el Manejo Integral del Recurso en el siglo XXI:

### 1. Desarrollo de nuevas fuentes.

Deberán tomarse en cuenta las modificaciones que los programas de administración de la demanda y uso eficiente del agua puedan introducir en los patrones de consumo, pues ésta es una vía poco costosa para satisfacer las necesidades de suministro. De manera similar, el reuso y la recarga artificial, son opciones de bajo costo que amplían la oferta, como lo es el tratar de aprovechar más ampliamente los acuíferos de la parte norte de la cuenca de México. Finalmente, será necesario establecer el gasto óptimo del acuífero del Valle de México, considerando factores como: la dependencia económica de la región en el recurso subterráneo, el deterioro de la calidad del agua con la profundidad, la disponibilidad y costo marginal para obtener nuevas fuentes de agua, el análisis del uso del agua, el impacto ambiental, predicciones confiables de la vida útil del acuífero y la influencia de programas de reestructuración de tarifas, medición, cobro y recarga.

### 2. Ampliar el tratamiento del agua residual.

Para aprovechar el amplio potencial de agua a rehabilitar, aproximadamente 44 m<sup>3</sup>/s, es necesario ejecutar programas más amplios de

tratamiento, cumpliendo con la ley de pretratamiento de aguas residuales de 1990. Así mismo, es importante ampliar y mejorar la capacidad para tratar el agua residual, tanto para eliminarla en condiciones más seguras como para reusarla.

### 3. Vigilancia y protección de la calidad del agua.

Implementar un programa de vigilancia para la identificación y el mapeo de áreas vulnerables de la ZMVM, asentamientos humanos, pozos activos, servicios de drenaje suministrados, industrias, tratamiento de aguas residuales y todas aquellas actividades que puedan contribuir a la contaminación del agua subterránea. Definiendo medidas tales como aumentar restricciones a las descargas industriales, controlar los residuos peligrosos, establecer instalaciones sanitarias y ejecutar programas de protección a las bocas de pozo y, la clausura y reubicación de pozos en producción.

### 4. Administración de la demanda.

Se deben implementar instrumentos como: programas públicos educacionales, readecuación de instalaciones sanitarias, leyes de conservación, programas de instalación y mantenimiento de medidores, planeación del uso del suelo urbano y sistemas tarifarios. La medición domiciliar debe complementarse con: extensión de los servicios a áreas no conectadas actualmente, renovación de instalaciones y reparación oportuna de fugas. De manera por demás prioritaria se debe promover la participación del público en la toma de decisiones relativas tanto a la privatización como a la administración de la demanda. Es importante fomentar la conservación del recurso entre la población en general. Deben explorarse las oportunidades de involucrar al sector privado en la educación del público.

## REFERENCIAS

1. Serra-Puche, M. C., "El pasado una forma de acercarnos al futuro, 25000 años de asentamientos en la cuenca de México", en

*Los problemas de la cuenca de México*, Kumate J. y Mazari, M. (eds.). México, El Colegio Nacional, 1990, pp. 3-29.

2. Consejo Nacional de Investigación, "El agua en la Ciudad de México", México, C.N.I., 1995.
3. Área Metropolitana de la ciudad de México-Síntesis de Resultados-X Censo General de Población y Vivienda 1990, México, INEGI, 1991.
4. Alanís L., Ortiz M. y Pérez E., "Abastecimiento de agua potable en el Valle de México", Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de México, Water Supply, Section 7, documento preliminar, Vistahermosa, 1993.
5. DDF., Interceptores profundos y el emisor central. Un nuevo sistema para el Distrito Federal, México, Dirección General de Obras Públicas, 1969.
6. *Compendio DGCOH, 1992*, México, Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 1992.
7. SPP-INEGI, "Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM); Síntesis de Resultados del X Censo General de Población y Vivienda, 1990", México, INEGI-S.P.P., 1991.
8. Lasser y Asociados, S.A. de C.V., "Interacción de zonas contaminadas por fugas de tanques almacenadores de gasolina", México, DGCOH, contrato 1-33-0693, 1991.
9. Islas, M. P. y Mazari, H. M., "Industria eléctrica-electrónica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: un análisis ambiental", *Memorias, IX Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C.*, México, 11 al 16 de Octubre, 1993.
10. Mazari, H.M., "Potential groundwater contamination by organic compounds in the Mexico City Metropolitan Area", Tesis



de doctorado, *Environmental Science and Engineering*, Universidad de California, 1992.

11. Pitre, C., "Analysis of Induced Recharge from a Wast Water Canal. Through Fractured Clays in Mexico City", M.Sc.Earth Science, tesis de maestría, Canadá, Universidad de Waterloo, 1993.
12. Acosta-Bendek, E. y Vázquez-Camargo, R., "Agua y salud en el Caribe colombiano" en: *Unimetro*, 5(9):58-69, 1989.
13. SSA-Sistema Nacional de Encuestas de Salud, *Encuestas sobre morbilidad, mortalidad y tratamiento de diarreas*, México, SSA, 1988.
14. Buenfil, Mario, *Household water metering and tariffs*, México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 1993.