

# Estimación del riesgo a la exposición de partículas suspendidas en el Valle de Toluca

Jesús Hernán Flores Ruiz\*, Pablo Peña García\*, Miguel Balcázar\*,  
Delfino Madrigal Uribe\*\*, Leonardo Alfonso Ramos Corona\*\*,  
Arturo López Martínez\* y José Morelos Martínez\*\*

Recepción: 6 de junio de 2008

Aceptación: 19 de mayo de 2009

\* Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), México, México.

\*\* Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Correo electrónico: [jesus.flores@inin.gob.mx](mailto:jesus.flores@inin.gob.mx);

[pablo.pena@inin.gob.mx](mailto:pablo.pena@inin.gob.mx); [miguel.balcazar@inin.gob.mx](mailto:miguel.balcazar@inin.gob.mx);

[dmadrigalu@uaemex.mx](mailto:dmadrigalu@uaemex.mx); [ramosalfonso@yahoo.com.mx](mailto:ramosalfonso@yahoo.com.mx);

[arturo.lopez@inin.gob.mx](mailto:arturo.lopez@inin.gob.mx) y [totobite2003@yahoo.com.mx](mailto:totobite2003@yahoo.com.mx)

**Resumen.** Las partículas PM10 suspendidas en la atmósfera afectan el sistema respiratorio humano, además presentan un riesgo potencial cancerígeno debido a la gran cantidad de hidrocarburos que se quema en la atmósfera. Se estimó la exposición de las partículas PM10 suspendidas en el Valle de Toluca y sus alrededores, con la información de 8 años, proporcionada por la Red Automática Monitoreo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMAT). Para la estimación de riesgo se tomó en consideración la distribución de Gumbel-1 de Valores Extremos, asimismo se utilizaron diferentes periodos de retorno y la ocurrencia probabilística en intervalos de tiempo de 1, 5, 10, 12.5, 15, 17.5 y 20 años. Se infirió, estadísticamente, un alto grado de riesgo a la salud, debido a la magnitud de la concentración media de estas partículas y se predice que, de existir las condiciones actuales, esta relación estadística permanecerá invariante dentro de los próximos 20 años.

**Palabras clave:** partículas PM10, predicción, riesgo a la salud.

## Risk Estimation to PM10 Particles Exposition in the Valley of Toluca

**Abstract.** Risk estimation to PM10 in the Toluca valley and surrounding areas was calculated, for several return periods, evaluating the occurrence probability to several interval times (1, 5, 10, 12.5, 15, 17.5 and 20 years) using the extreme values of the Gumbel-1 distribution. These intervals were employed to predict and analyze the behaviour of maximum contaminant concentrations in the study region. A high degree of risk to health due to the mean concentration of these particles is obtained from statistical considerations. The evaluation took into consideration the eight monitoring years from the Automatic Monitoring Network (RAMA) and its output predictions. If present conditions maintain, this statistical relation will remain invariant over the next 20 years. Such particles affect the human respiratory system and, besides, present a carcinogenic potential due to the volume of hydrocarbon combustion to the atmosphere.

**Key words:** PM10 particles, Risk Prediction, Health risk.

## Introducción

Las partículas suspendidas en la atmósfera menor a 10  $\mu\text{m}$  de diámetro (PM10), pueden ser inhaladas y llegar a los pulmones, causando daños a la salud. A éstas partículas se les considera un mejor indicador de la calidad del aire que las partículas suspendidas totales (PST), que anteriormente se utilizaban como criterio de contaminante. La norma vigente de calidad del aire para PM10 adoptada en México es de 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas (NOM-025-SSA-1-1993).

La exposición a PM10 ha generado una gran atención por los programas ambientales en los últimos años, pues los estudios realizados demuestran una asociación significativa entre la concentración atmosférica de partículas suspendidas en la fracción respirable, y el riesgo de mortalidad en la población, ya que se estima un incremento del 3% en la mortalidad diaria, por cada incremento de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM10, a partir del valor de la norma establecida, probablemente, ésta sea una asociación significativa con cánceres en el sistema pulmonar (Flores *et al.*, 1998; Rosales-Castillo *et al.*, 2001;

Munguía y Pérez, 2003 ). Los efectos nocivos de las partículas suspendidas no se limitan al aparato respiratorio, sino que pueden dañar otros aparatos y sistemas como el sistema cardiovascular (NOM-025-SSA1-1993; Thurston *et al.*, 1992; 1993; Riojas-Rodríguez *et al.*, 2006). Es importante observar que no existe una concentración mínima en la cual ya no se detecten riesgos en la salud (Aire Limpio, 2007).

Mejorar la calidad del aire respirable es uno de los desafíos de mayor interés y preocupación que presentan los habitantes de la zona metropolitana del Valle de Toluca. Los problemas de contaminación atmosférica es el reflejo de grandes implicaciones de carácter estructural, funcional y territorial, que están vinculadas con la forma en que se usa y maneja el entorno atmosférico.

En la exposición de los contaminantes a los habitantes del Valle de Toluca existen diferencias, debido a la presencia de un fuerte gradiente de concentración espacial, de acuerdo con los datos proporcionados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (<http://www2.ine.gob.mx/dgicurg/calair/tend/concentra.php>). En el año 2004 en la ZMVT emitieron poco más de 750 toneladas de contaminantes a la atmósfera, tanto por fuentes móviles y fijas (Aire Limpio, 2007).

El objetivo de este trabajo es analizar la incidencia máxima de las partículas PM10 en el Valle de Toluca evaluando el riesgo a la salud en las zonas de concentración más probable. Para ello se consideran los de valores extremos de concentración y se usan las distribuciones probabilísticas de Gumbel-1

y 3, modelándose la distribución de las partículas PM10 en periodos anuales desde 1998 hasta 2005.

### 1. Red Automática de Monitoreo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

En 1993 se estableció un sistema denominado Red Automática de Monitoreo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMAT), con la finalidad de obtener un registro continuo y sistemático de la contaminación del aire en el Valle de Toluca (GEM, 2007).

La RAMA-ZMVTs está integrada por un centro de Control y siete estaciones remotas de monitoreo fijas, de las cuales tres están ubicadas en la zona norte, dos en la sur y dos en la parte central de la ZMVT. Asimismo, está integrada por tres subsistemas operativos:

- a) Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMAT).
- b) Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA).
- c) Red Meteorológica (RETMET).

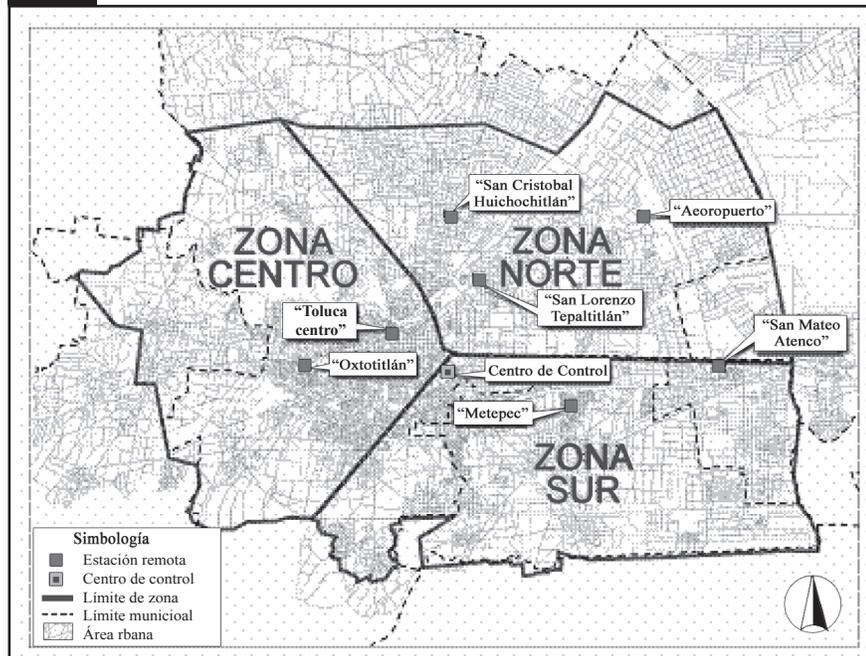
Adicionalmente cuenta con una Unidad Móvil de monitoreo que opera las 24 horas, durante todo el año, por lo que la generación de datos es constante y en tiempo real. En la figura 1 y en el cuadro 1, se muestra la localización geográfica y detallada de las estaciones de monitoreo de la RAMA.

Todas las estaciones de la RAMA-ZMVT tienen un sistema de colección de muestras de partículas suspendidas. Las muestras se evalúan de acuerdo con la técnica de análisis correspondientes, se registran las concentraciones de contaminantes presentes en

la atmósfera y se hacen del acceso público (<http://www2.ine.gob.mx/dgicurg/calair/tend/concentra.php>).

Para la determinación de la concentración de partículas PM10, el principio radiométrico, es por medio de la absorción de radiación beta, que consiste en la medición de la atenuación que se origina por medio de un haz de rayos beta emitidos por una fuente radioactiva de carbono 14. Cuando los electrones pasan a través de un filtro de fibra de vidrio en forma de cinta continua (Glass Fiber Type) que se desplaza en función del tiempo, sobre la cual se ha depositado el material particulado, dichos electrones son parcialmente absorbidos y en consecuencia, la intensidad del flujo de electrones disminuye y es medido con un contador Geiger. Si la cantidad de partículas en el filtro

Figura 1. Localización de Red Automática de Monitoreo de la ZMVT.



Fuente: AIRE LIMPIO, 2007.

es alta, el detector Geiger recibe poca radiación. Si la cantidad de partículas en el filtro es baja, el detector recibe más radiación, por lo que la cantidad de partículas, se cuantifica mediante la diferencia entre la radiación absorbida por la muestra y la recibida por el detector (Caselli, 1992). Para la RAMAT el equipo utilizado es el Beta Attenuation Monitor (BAM) modelo 1020 (figura 2).

El análisis realizado en el presente trabajo, tomó en consideración los datos de los últimos 8 años registrados en el catálogo de la RAMA. Los diferentes escenarios analizados son estimados por medio de la distribución Gumbel-I, en donde se obtienen periodos de retorno de predicción de la concentración de la PM10.

## 2. Sitio

La zona de estudio es un polo de desarrollo económico importante; está comprendida entre las coordenadas 19.26° a 19.32° de latitud Norte y 98.54° a 99.68° de longitud Oeste, que incluye la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) y los municipios conurbados (Meteppec, Lerma, Zinacantepec, San Mateo Atenco, Ocoyoacac y Xonacatlán).

## 3. Procesamiento de datos de las PM10 (1998-2005)

Debido a la naturaleza probabilista de la ocurrencia de los fenómenos atmosféricos, se utilizan diferentes modelos estadísticos para la predicción de la magnitud de concentración de los contaminantes en el aire. Los modelos proporcionan una herramienta en la toma de decisión, siempre y cuando se tengan los suficientes datos. La evaluación estadística puede ser insatisfactoria, si se tienen periodos sin datos o si el estudio es rudimentario, además de la incertidumbre asociada a los parámetros estadísticos que describen los fenómenos en la atmósfera (Burton, 1979). Entonces, la precisión con que los datos se obtienen, es un factor importante en el análisis de la estabilidad numérica del sistema y consecuentemente en la evaluación de los resultados.

Figura 2. Cabezal del equipo para medición de partículas.



Cuadro 1. Localización de las estaciones de monitoreo de la RAMAT.

Estación	Localización	Coordenadas geográficas
Oxtotitlán (OXT)	Escuela Primaria Carmen Serdán. Calle Lago Caimanero esq. Laguna de La Asunción, Col. Nueva Oxtotitán. Municipio: Toluca.	Longitud: 99° 41' 00.6" Latitud: 19° 17' 00.6"
Toluca centro (TOL)	Plaza España Av. Juárez Norte esq. Santos Degollado. Municipio: Toluca	Longitud: 99° 39' 19.0" Latitud: 19° 17' 39.4"
Meteppec (MET)	Av. Meteppec esq. Manzana Izcalli Cuauhtémoc V. Municipio: Meteppec.	Longitud: 99° 35' 42.9" Latitud: 19° 16' 12.8"
San Lorenzo Tepaltitlán (SLT)	Escuela Secundaria José Vasconcelos Av. Independencia No. 14. San Lorenzo Tepaltitlán. Municipio: Toluca.	Longitud: 99° 37' 35.6" Latitud: 19° 18' 44.9"
San Mateo Atenco (SMA)	Av. Hacienda de Tres Marías s/n. Fracc. Santa Elena Municipio: San Mateo Atenco.	Longitud: 99° 32' 30.4" Latitud: 19° 16' 49.5"
Aeropuerto (AER)	Centro Nacional de Capacitación y Adiestramiento de la Cruz Roja Mexicana. Bld. Miguel Alemán. Municipio: Toluca.	Longitud: 99° 34' 16.4" Latitud: 19° 19' 54.1"
San Cristóbal Huichochitán (SCH)	Escuela Primaria Manuel Hinojosa Giles. Calle Guadalupe Victoria, antiguo camino a La Magdalena. San Cristóbal Huichochitán. Municipio: Toluca.	Longitud: 99° 38' 03.3" Latitud: 19° 19' 38.1"

Fuente: AIRE LIMPIO, 2007.

#### 4. Tratamiento estadístico

Generalmente se tienen tres métodos para el tratamiento estadístico:

a) Los métodos que procesan todo el conjunto de datos. Ejemplo la Ley de Frecuencia Acumulada (Gutenberg-Richter, 1944).

b) Análisis espacio temporal. Utiliza un modelo dinámico lineal. El modelo de covariancia es el indicado para la interacción entre los componentes espacio temporales que han sido aplicados como caso particular (Stein, 2005; Zheng *et al.*, 2007).

c) Método de la Estadística de Valores Extremos. Este es el método utilizado en este trabajo para modelar valores de predicción, a partir del conjunto de datos anuales de los datos de la RAMA-ZMVT.

Método de la estadística de valores extremos. Es un análisis espacio temporal que pronostica los periodos de retorno y la probabilidad de ocurrencia en distintos intervalos de tiempo. El método utiliza parte del conjunto de los datos, usando valores extremos anuales de los datos de la RAMA-ZMVT. Este método es descrito por Gumbel (1958), el cual ha sido aplicado a diferentes ramas de Ciencias de la Tierra; Hidrología (Gumbel, 1941), riesgo de lluvia (Vidal *et al.*, 2004; Flores *et al.*, 2006), Meteorología (Gumbel, 1942; Jekinson, 1955), Climatología (Kiladas and Díaz, 1989; Gershunov and Barnett, 1998; Bidegain and Renom, 2001) y riesgo sísmico (Burton *et al.*, 1986; Flores, 1988; Flores *et al.*, 1990, Flores *et al.*, 1997). Las ventajas y limitaciones de la metodología han sido discutidas ampliamente por Burton (1979) y por Burton and Makropoulos (1986).

La función de probabilidad  $F(x)$  de la variable aleatoria es:

$$F(x) = p(x \leq m) \tag{1}$$

Buscando el valor extremo de la variable  $x$  si  $F(x)$  es digitalizada, la probabilidad de que  $m$  sea un valor extremo obtenido de  $n$  muestras independientes está dado por:

$$G(m) = P(x_1 \leq m, \dots, x_2 \leq m, \dots, x_n \leq m) \tag{2}$$

Puesto que:

$$G(m) = F^n(x) \tag{3}$$

Si la población  $F(x)$  está bien definida, se puede suponer la distribución de Poisson, entonces la distribución de Gumbel  $G(m)$  está también definida. Por lo general la distribución

$F(x)$  es no conocida, pero Gumbel demostró que si  $F(x)$  es una de varias “distribuciones exponenciales”, entonces  $G(m)$  sería una distribución asintótica de valores extremos con 3 posibilidades. Comúnmente la  $G-3$  se usa estimar el riesgo (Burton and Makropoulos (1986).

#### 5. Estimación del periodo de retorno

Para el estudio de los patrones y tendencias de la dispersión de las PM10, se elaboró un catálogo de concentraciones máximas considerando las 7 estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT, en el periodo comprendido de 1998 a 2005, aplicando la distribución de Gumbel-I de valores extremos (Gumbel E. J., 1935; Gumbel E. J., 1941; Gringorten, 1963).

Las expresiones que rigen este tipo de estadística,  $G-1$  y  $G-3$  son funciones de distribución asintótica, las cuales son expresadas por las siguientes densidades de probabilidad:

$$G-1(m) = \exp[-\exp A(m-B)] \tag{4}$$

y:

$$G-3(m) = \exp\left[-\frac{(W-m)}{(W-U)^k}\right]; \quad m > W \tag{5}$$

$$G-3(m) = 1; \quad m < W$$

Donde las  $G$ 's son la probabilidad que no excede la magnitud de la PM10, donde  $A$  y  $B$  son parámetros que caracterizan a  $G-1$ .

Siguiendo con las muestras en el tiempo ( $n$ ) en años, la magnitud máxima seleccionada del catálogo (1998-2006), la  $i$ -ésima muestra es:

$$G(m) = \frac{i}{n+1} \tag{6}$$

A partir de la ecuación 3 es posible determinar el periodo de retorno  $T(m)$  en años.

$$Ti(m) = \frac{1}{(1-Gi(m))} \tag{7}$$

Las ecuaciones 1 y 2 son las relaciones fundamentales necesarias para expresar las funciones de densidad de probabilidad de  $G-1$  y  $G-3$ . Es útil usar en predicciones el mayor valor de magnitud de la PM10, en el sentido de determinar el riesgo que representa a la salud en periodos de retorno específico, este riesgo puede ser definido como un porcentaje

de probabilidad de ocurrencia crítica caracterizada por una magnitud asociada a un periodo específico de tiempo (Flores Ruiz J. H., *et al.*, 1997).

Empleando la optimización (mejor ajuste) para estimar los parámetros de  $G - 1$ , es posible calcular el riesgo  $R(m)$  en  $T$  periodos de retorno, es decir:

$$R1(m) = 1 - \exp [ T \exp(A(m-B)) ] \tag{8}$$

Una expresión similar a la ecuación 5, se puede obtener para  $D$  periodos  $T \gg D$  resultando:

$$R1(m) = 1 - (G1(m))^D \tag{9}$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores resulta:

$$R1(m) = 1 - \exp \left( \frac{D}{T} \right) \ln (1 - R1) \left( \frac{m}{T} \right) \tag{10}$$

Con las expresiones establecidas se puede entonces estimar la probabilidad del riesgo del modelo  $G - 1$  asociado a una distribución asintótica.

Para el análisis de este contaminante se consideró el valor normado de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas, anterior a la modificación de la NOM-025- SSA1-1993, con la finalidad de utilizar un criterio homogéneo durante el periodo de estudio.

## 6. Resultados

Tomando en consideración la norma vigente de calidad del aire para PM10, y el catálogo de la concentración de las partículas PM10, en el Valle de Toluca, en el periodo (1998-2005), se obtuvieron las estimaciones para periodos de retorno de (1.20, 1.22, 1.25, 1.28, 1.31, 1.35, 1.39 años, con sus respectivas magnitudes de concentración de partículas en la atmósfera de 160, 210, 260, 310, 360, 410, 460  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , asociando sus diferentes periodos de retorno con sus respectivas probabilidades. Los resultados se muestran en los cuadros 2 y 3.

Magnitud de concentración mínima ( $m$ ) =  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Periodo analizado = 8 años

Número de datos = 56

Número de iteraciones = 6

Estimación de los parámetros de  $G - i (m)$

Parámetros de ajuste del estimador:

$A = 0.2000$ ;  $B = 2.9000$

Posteriormente se estima la predicción de la concentración de las partículas PM10 con la distribución de  $G - 1$ , para las magnitudes anteriores que se encuentran por arriba de la norma mencionada anteriormente. Se observa en el cuadro anterior del orden de 1.33, 1.75, 2.16, 2.58, 3.0, 3.41, 3.83 veces, lo que indica que ocurrirán eventos con valor promedio del periodo retorno de 1.28 años como se aprecia en el cuadro 3, originada de la distribución  $G - 1$ .

En el análisis se consideró la estadística de los valores extremos, con lo cual se determinó el riesgo debido a la concentración de la contaminación anual en el periodo de 1998 a 2005, se pronostica periodos de retorno de: 1, 5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 años, de acuerdo con la estimación realizada por medio del modelo de  $G - 1$ .

De la probabilidad de ocurrencia en sus respectivos intervalos de tiempo, se observa en el cuadro 4 que las magnitudes de concentraciones de partículas PM10, tendrá una probabilidad de 100%.

**Cuadro 2. Catálogo 1998-2005 de la concentración de la PM10 ( g/m3) en el Valle de Toluca.**

Años	San Cristobal	Tepatitlán	Aeropuerto	Toluca Centro	San Mateo Atenco	Metepec	Oxtotitlán	Promedio
1998	105	100	75	105	70	85	110	92
1999	125	125	95	110	90	95	105	106
2000	105	105	85	75	80	70	60	82
2001	100	95	75	70	75	80	50	77
2002	110	100	90	85	90	90	55	88
2003	160	155	145	140	140	135	125	142
2004	160	145	150	150	145	145	135	147
2005	175	175	165	170	165	165	160	167

Fuente: web.edomexico.gob.mx/portal/page/portal/calidaddelaire.

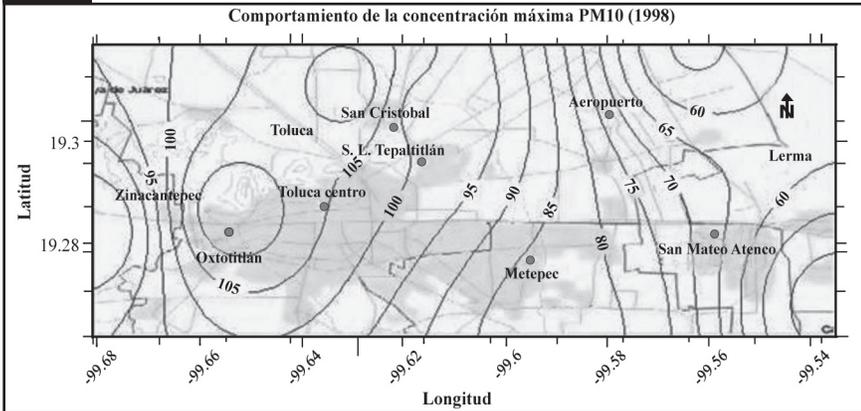
**Cuadro 3. Predicción de la concentración de las partículas PM10.**

Máxima Magnitud ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Máxima Magnitud ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
160	1.20
210	1.22
260	1.25
310	1.28
360	1.31
410	1.35
460	1.39

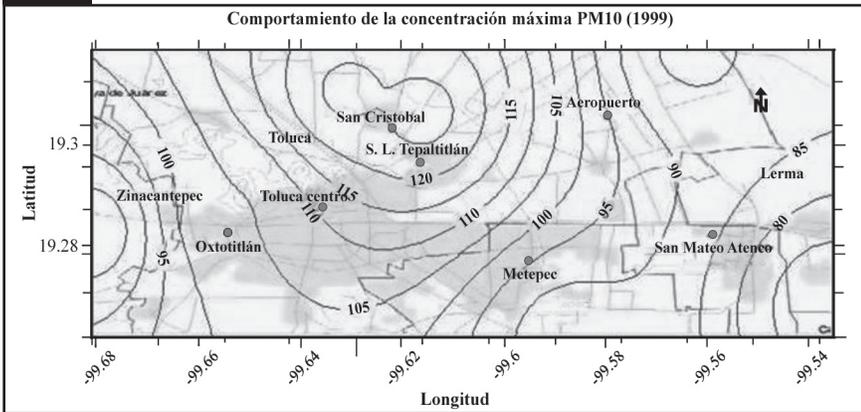
**Cuadro 4. Predicción de la concentración de la PM10. Determinados por la distribución de Gumbel-1.**

Magnitud ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Intervalo de tiempo (años)						
	1	5	10	12.5	15	17.5	20
160	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
210	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
260	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
310	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
360	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
410	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
460	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

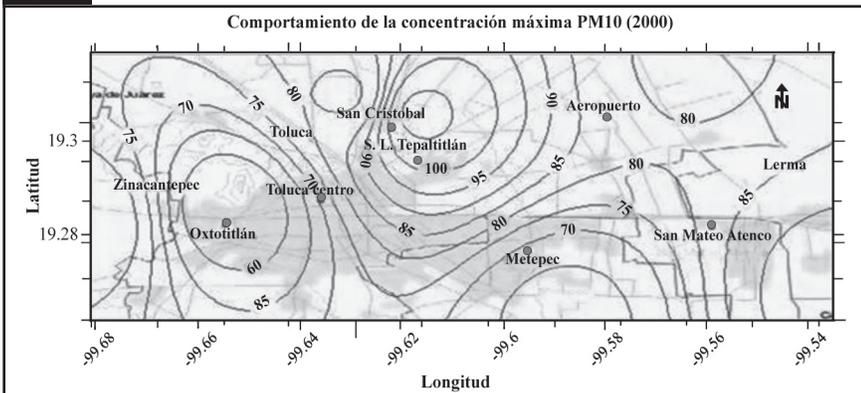
**Figura 3.** Distribución anual de las partículas PM10 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



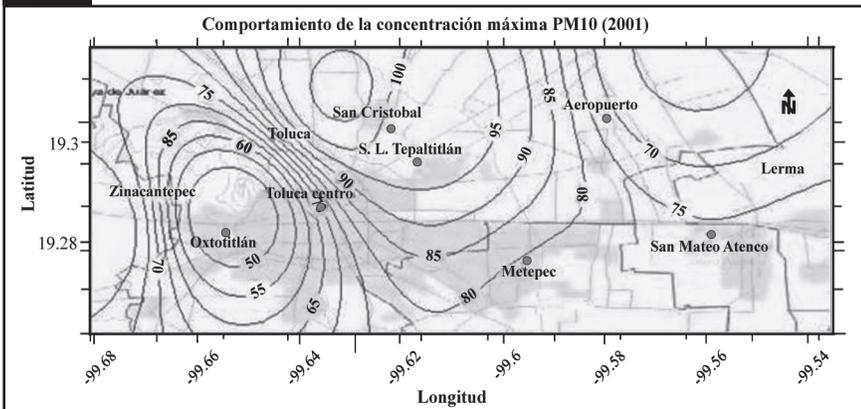
**Figura 4.** Distribución anual de las partículas PM10 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



**Figura 5.** Distribución anual de las partículas PM10 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



**Figura 6.** Distribución anual de las partículas PM10 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



El modelo aplicado indica que la contaminación por partículas suspendidas seguirá ocurriendo, a no ser que exista un cambio en el control y verificación en la política ambiental en fuentes fijas móviles. Las partículas suspendidas en el aire afectan el sistema respiratorio humano; éstas tienen un potencial de causar daños (cancerígenos) a los pulmones debido a la quema de hidrocarburos a la atmósfera, emitidos principalmente por fuentes fijas y móviles en el Valle de Toluca (Flores *et al.*, 1998).

Las concentraciones máximas calculadas para el año 1998, mostraron un máximo en Oxtotitlán de  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se observa en la figura 3 (mapas realizados tomando como mapa base ([www.sinaica.ine.gob.mx/rama\\_zmvt.html](http://www.sinaica.ine.gob.mx/rama_zmvt.html)) un gradiente máximo de  $110 \text{ g}/3$  a  $60 \text{ g}/\text{m}^3$ , desde Toluca Centro a Lerma, con dirección W-E.

Con respecto a la concentración máxima PM10 para el año 1999, la figura 4 indica la máxima concentración en San Cristóbal con  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y el mínimo gradiente se tiene hacia San Mateo Atenco, en la dirección NW-SE, con un valor de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

De acuerdo con los resultados mostrados por el modelo aplicado, para el año 2000 en la figura 5, la PM10 tiene concentración en San Cristóbal de entre  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; una máxima concentración en Tepalitlán en el rango de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $105 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Toluca centro de entre  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; el mínimo se observa en Oxtotitlán con  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El gradiente máximo se obtiene en San Mateo Atenco con  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  tanto en la dirección SW-NE como SE-NW.

Para el caso de la PM10, en el año 2001, la figura 6 muestra la máxima concentración en San Cristóbal en el intervalo de  $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Toluca centro entre  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el mínimo en Oxtotitlán  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

m<sup>3</sup>, en San Mateo Atenco varía de 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , con dirección tanto del NE-SW como del NW-SE.

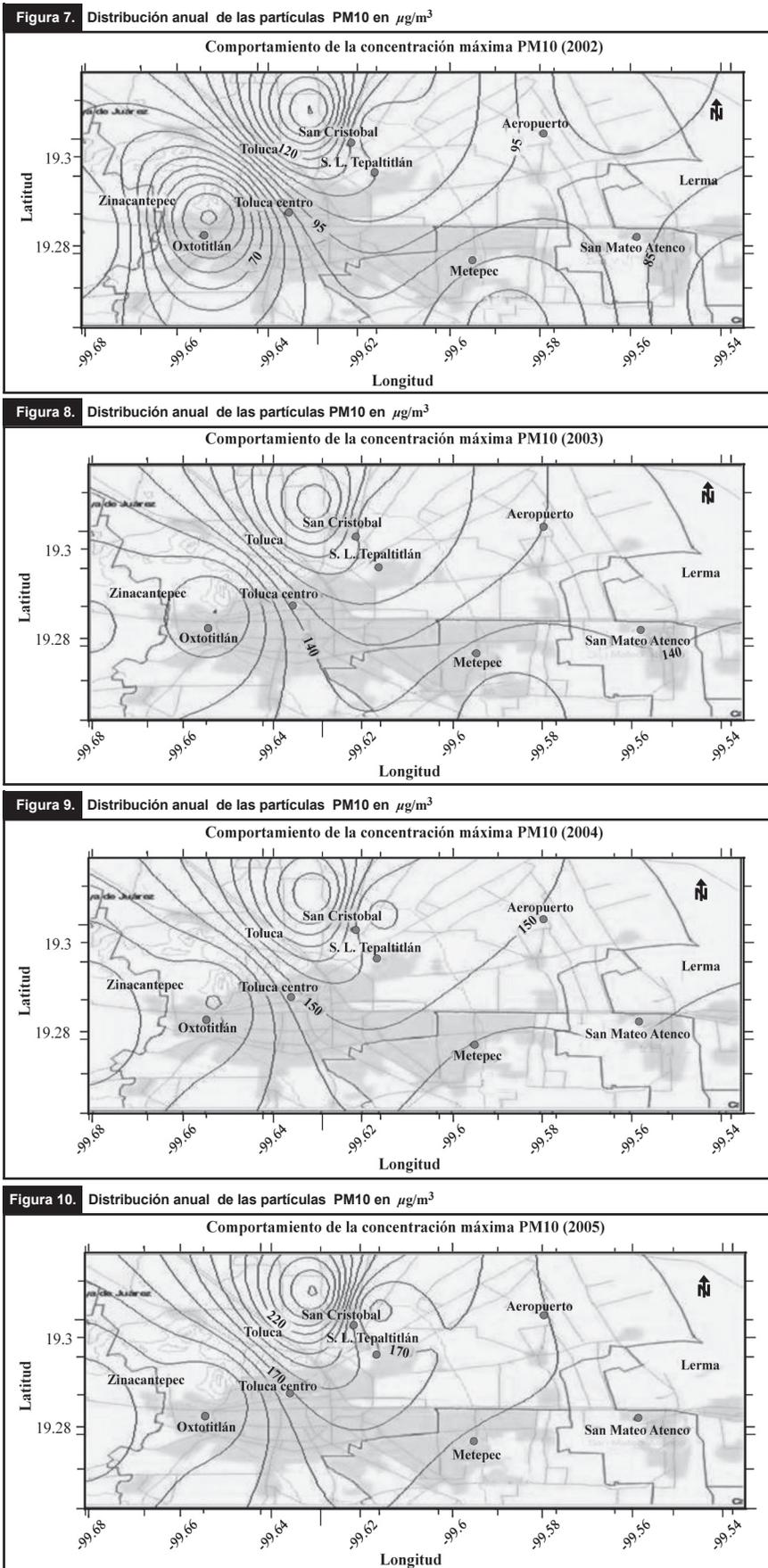
La distribución de concentraciones PM10 para el año 2002, (figura 7), muestra su máximo en San Cristóbal 135  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Tepatitlán varía de 110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Toluca centro entre 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , el mínimo es Oxtotitlán 85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y San Mateo Atenco tiene un intervalo de 90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Para el año 2003 la concentración máxima de PM10, de acuerdo con los resultados mostrados en la figura 8, se tiene en San Cristóbal en el intervalo de 155  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 170  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Oxtotitlán 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Toluca centro tiene un gradiente desde 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y San Mateo Atenco presenta 140 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Las concentraciones PM10 para el año 2004 (figura 9), son más elevadas; el máximo gradiente se tiene en San Cristóbal variando de 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  hasta 170  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , en una región reducida; Oxtotitlán 125, Tepatitlán varía de 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 165  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Toluca centro presenta también un gran gradiente desde 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y San Mateo Atenco es del orden de 140 en ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

En el año 2005 la concentración de PM10 se incrementó aun más (figura 10), con un máximo en San Cristóbal y un gradiente iniciando desde 170  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 230  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Tepatitlán es 170  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 185  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Oxtotitlán 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 155  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Toluca centro tiene un gradiente desde 155  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 175  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En dirección NE-SW.

El comportamiento de la distribución de la PM10 en la zona de estudio probablemente se debe tanto al alto incremento en los últimos años de las fuentes móviles (parque vehicular) como a las fuentes fijas en el corredor industrial de Lerma así como a la dirección dominante de los vientos que son del SE-NW (Hernández Romero *et al.*, 2005).



La figura 11 resume la concentración promedio de partículas M10 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , de las ocho estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT desde el año 1998 hasta el 2005.

Los máximos locales de las series anuales de San Cristóbal se encuentran arriba de la norma 120 son (125, 160, 160, 175  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Tepatlitlán (125, 155, 145, 175  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Aeropuerto (145, 150, 165  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Toluca centro (140, 150, 170  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), San Mateo (140, 145, 165  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y Oxtotitlán (125, 135, 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Se observa que a partir de 2003 se incrementan los valores y rebasan la Norma en todas las estaciones de monitoreo, especialmente en San Cristóbal.

**Conclusiones**

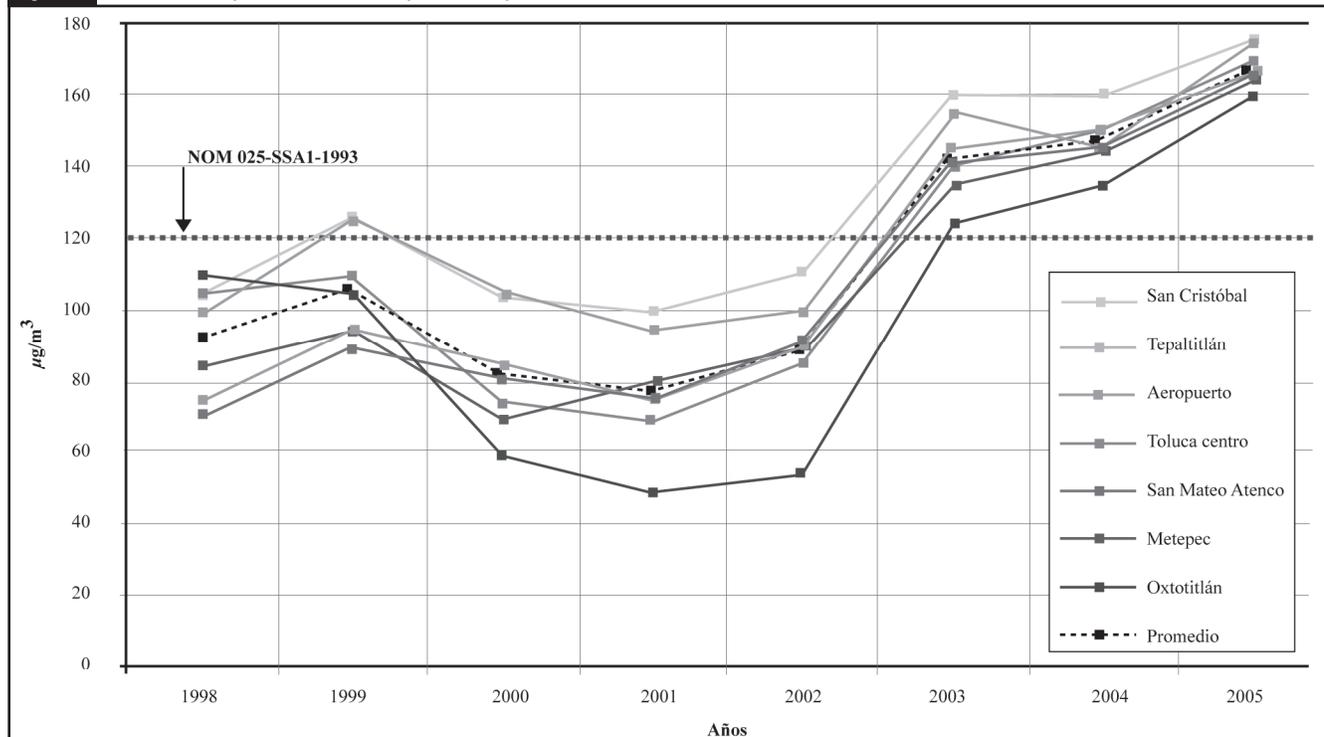
- Debido a la contaminación atmosférica causada por las partículas PM10 en el Valle de Toluca y sus alrededores. Con base en los datos proporcionados por RAMAT para este trabajo se elaboró un catálogo del periodo 1998 al 2005. La concentración promedio anual con 56 datos mensuales es 113.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estos datos están por debajo de la norma oficial (NOM-025-SSA1-1993).
- Se estimó el riesgo de la concentración como la probabilidad de ocurrencia a distintos intervalos de tiempo que van desde 1, 5, 10, 12.5, 15, 17.5 y hasta 20 años.
- Se estimaron los periodos de retorno que varían desde 1.20 hasta 1.39 años dando como resultados magnitudes de

entre 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  hasta 460  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para un pronóstico a 20 años.

- Se obtuvieron valores determinísticos cuyos valores probabilísticos son del 100% para las magnitudes de concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de 160, 210, 260, 310, 360, 410 y 460.
- Este comportamiento probablemente es debido tanto al alto incremento en los últimos años de las fuentes móviles (parque vehicular), como a las fijas en el corredor industrial de Lerma así como a la dirección dominante de los vientos (SE-NW).
- A partir de las modelaciones se elaboraron mapas anuales de distribución de la concentración de partícula P10 en el periodo 1998 a 2005. Los valores máximos de contaminación de ellas se presentan principalmente en San Cristóbal, en segundo lugar en Tepatlitlán, tercer lugar en Toluca centro; los mínimos se localizan en Oxtotitlán a excepción de los dos primeros años (1998-1999), en los cuales el mínimo se presentó de la estación de monitoreo de San Mateo Atenco.
- El modelo empleado indica que la contaminación por partículas suspendidas seguirá ocurriendo, a no ser que exista un cambio en el control y verificación en la política ambiental en fuentes fijas móviles. Las partículas suspendidas en el aire afectan el sistema respiratorio humano, causando severos daños pulmonares debido a la combustión de hidrocarburos a la atmósfera, emitidos principalmente por fuentes fijas y móviles en el Valle de Toluca.

aire

**Figura 11.** Resumen en tiempo de la concentración promedio de partículas PM10 en las ocho estaciones de monitoreo.



## Bibliografía

- Aire Limpio (2007). Programa para el Valle de Toluca 2007-2011. Gobierno del Estado de México
- Bidegain M. y M. Renom (2001). Extremes Temperatures Probability Distributions Functions and ENSO phases. IAI-055 CoPIs SECOND MEETING. Asunción, Paraguay: 1-7.
- Burton P. W. (1979). "Seismic Risk in Southern in Europe Through in the India Examined Using Gumbel's Third Distribution of Extreme Values", *Geophys. Royal. Astron. Soc.*, 59 (2).
- Burton P. W. y K. C. Makropoulos (1986). Seismic Hazard Parameter Using Gumbel's, Theory of the Extreme Value Statistics, Computers and Geosciences, 12-1.
- Caselli, M. (1992). *La contaminación atmosférica*. Siglo XXI editores.
- Flores Ruiz, J. H. (1990). Estimación de periodos sísmico en la planta nuclear de Laguna verde. Asociación Mexicana de Geofísica de Exploración, AMGE. 30-2.
- Flores Ruiz, J. H. (1988). "Seismicity and earthquake risk at the Nuclear Power Station of Laguna Verde, Veracruz", *Geological Survey of Japan*. GSJ, JICA.
- Flores Ruiz J. H., R. Arguelles Fernández, M. E. Camacho López y J. Urrutia Fucugauchi (1997). "Evaluación del riesgo sísmico en el Centro Nuclear, aplicación de la distribución de Gumbel -1". *Revista Facultad de Ingeniería UNAM (II)*, México.
- Flores Ruiz J. H.; F. L. Olgún; G. M. Cisniega; J. F. Urrutia y C. E. Cruz (1998). *Characterization of Volcanic Ashes from the June 1997 Explosive Activity of Popocatepetl Volcano-Mexico City International Airport Area*. 50<sup>th</sup> Anniversary of Foundation of the ESIQIE. May 25.
- Flores Ruiz J. H.; P. Peña García; M. Balcázar García; A. López Martínez; M. Mireles Gómez y J. Urrutia Fucugauchi (2006). "Modelación de lluvias máximas en el estado de Tabasco y sus alrededores", *III Encuentro de Participación de la Mujer en la Ciencia*, México.
- Gershunov, A. y T. Barnett (1998). "ENSO Influence on Intraseasonal Extreme Rainfall and Temperature Frequencies in the Contiguous, United States, Observations and Models results", *J. of Climate*, 11.
- Gringorten, I. (1963). "A plotting rule for extreme probability paper", *Journal Geophysics Research*. 68.
- Gumbel, E. J. (1935). "Les Valeurs Extremes des Distributions Statistiques", *Annales de l'Institut Henri Poincaré*, IV-2.
- Gumbel E. J. (1941). "The Return Period of Flood Flows", *Annals Mathematics Statistics*, Vol. 12, Núm. 2.
- Gumbel, E. J. (1942). "On the Frequency Distribution of Extreme Values in Meteorologic Data". *Bull. Amer. Met. Soc.* 23.
- Gumbel, E. J. (1958). "Statistics of Extreme Value". Columbia Univ. Press. N.Y.
- Gutenberg B. y C. F. Richter (1944). "Frequency of the Earthquakes in California. Bull", *Seis. Soc. America*. 4.
- Hernández Romero, J. C.; D. Madrigal Uribe y C. Morales Méndez (2005). "Comportamiento del monóxido de carbono y el clima de la ciudad de Toluca 1995-2001", *CIENCIA ergo sum*, Vol. 11, Núm. 3.
- Jekinson, A. F. (1955). "The Frequency Distribution of the Annual |Maximum of Minimum Values of Meteorological Elements", *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 87.
- Kiladas, G. N. y H. F. Diaz (1989). "Global Climatic Anomalies Associated with the Eextremes in the Southern Oscillation", *J. of Climate*, 2.
- Munguía Castro, M. E. y J. Pérez Neria (2003). "La contaminación atmosférica en el sur de la Zona Metropolitana del Valle de México", *Rev. Int. Nal. Enf. Resp. Mex.*, Vol. 16, Núm. 1.
- NOM-025-SSA1-1993, "Salud ambiental", Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas menores de 10 micras (PM10).
- Riojas-Rodríguez H.; F. Holguín; A. González-Hermosillo y I. Romieu (2006). *Uso de la variabilidad de la frecuencia cardiaca como marcador de los efectos cardiovasculares asociados con la contaminación del aire*. Salud Pública de México, Vol. 48 Núm. 4.
- Rosales-Castillo, J. A.; V. M. Torres-Mesa; G. Olaiz-Fernandez y V. H. Borja-Aburto (2001). "Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos". *Salud Pública de México*, Vol. 43, Núm. 6.
- Secretaría del Medio Ambiente (2007). Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2004. Gobierno del Estado de México.
- Stein, M. L. (2005). "Space-time Covariance Functions", *Journal of the American Statistical Association*, 100.
- Thurston, G.; K. Ito; P. L. Kinney y M. Lippmann (1992). *Anal. Environ. Epidemiol.* 2.
- Thurston, G.; K. Ito; M. Lippmann y D. V. Bates (1993). *Am. Rev. Respir. Dis.*, 147.
- Veblenn, D. R.; P. R. Buseck and C.W. Burnham (1977). "Abestiform Chain Silicates: New Minerals and Structural Groups", *Science*.
- Vidal García, M. C.; J. H. Flores Ruiz; J. Urrutia Fucugauchi; A. Mejía Ramírez y M. Mireles Gómez (2004). "Modelación de lluvias máximas en la zona del Valle de México (zvm) usando la distribución de Gumbels-III., Groundwater Flow", *XXXIII Congres IAH & 7º Congres ALHSD*. October, Zacatecas México.
- Zheng, J.; J. Swall; W. M. Cox y J. M. Davis (2007). "Interannual variation in meteorological adjusted ozone levels in the eastern United States: A comparison of two approaches", *Atmospheric Environment*, Vol. 41. Núm. 4.