
Análisis temporal de las concentraciones y morfología de partículas suspendidas menores a 10 micrometros de la zona industrial del Valle de Toluca, Estado de México

¹Fredy Cuellar * , ¹Manuel A. Borja, ²Eduardo Ordoñez, ³Iván Rodríguez

¹Instituto Tecnológico de Toluca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av Tecnológico s/n Ex Rancho La Virgen, Metepec, Estado de México, C.P. 52140 ²Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Departamento de Química. Apdo. Postal 18-1027 A.P.México, D.F., ³Universidad de las Villas de Santa Clara, Carretera a Camajuaní, Km 51/2, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Temporal trend on concentration and morphology of atmospheric suspended particles lower than 10 µm at industrial zone of Toluca Valley, Mexico State

Anàlisi temporal de les concentracions i morfologia de partícules suspeses inferiors a 10 micròmetres de la zona industrial de la Vall de Toluca, Estat de Mèxic

Recibido: 11 de mayo de 2009; revisado: 9 de julio de 2009; aceptado: 15 de julio de 2009

RESUMEN

En la ciudad de Toluca, existe preocupación por los niveles de concentración de partículas que se han presentado en los últimos años, los cuales han llegado a rebasar la norma ambiental. Sin embargo, los estudios enfocados a partículas son escasos. Además, se debe tomar en cuenta que en esta zona no sólo se asientan 1,2 millones de habitantes, sino que también se ubican en ella los corredores industriales "Toluca-Lerma" y "Toluca 2000", además de siete parques industriales y un parque vehicular de más de 260 mil unidades.

El objetivo de este estudio fue analizar el comportamiento temporal de la fracción respirable de partículas (PM₁₀) y observar las posibles diferencias en su concentración y morfología a través del año en la zona industrial de Toluca. Se monitorearon en 12 sitios en un área aproximada de 17 kilómetros cuadrados, durante un año. Los muestreos se realizaron cada 3 días. Para el muestreo y la determinación gravimétrica se siguió el método USEPA IO.2.1. Las mayores concentraciones se observaron en los puntos 6, 7, 8 y 9 que corresponden al período de estiaje, mientras que con menor frecuencia de rebase de la norma se presentó la primavera-verano tanto de 2005 como de 2006. Las comparaciones de medias entre las observaciones de las estaciones otoño-invierno (OI, estiaje) y de primavera-verano (PV, lluvias), mostraron diferencias estadísticas entre las categorías comparadas (intervalo de confianza del 95%). Para la morfología de partículas se utilizó microscopía electrónica de barrido (MEB) y mediante el análisis de partículas individuales se observó que la morfología de las partículas no presenta diferencias entre los períodos PV y OI. En conclusión, existe una marcada diferencia en el comportamiento temporal de las concentraciones de PM₁₀ (partículas menores a 10 micrómetros) en la zona industrial del Valle de Toluca.

Palabras clave: PM₁₀, MEB, morfología de partículas, análisis temporal.

SUMMARY

In the city of Toluca, there is concern about the concentration levels of particles that have arisen in recent years, which have come to exceed the environmental standard, but the studies focused on particles are scarce, in addition one is due to take into account that in this zone not only is based 1,2 million inhabitants, but that also are located in her the industrial runners "Toluca-Lerma" and "Toluca 2000", in addition to seven industrial parks and a park to vehicular of more than 260 thousand units.

The aim of this study was to analyze the behavior of temporary fraction respirable particulates (PM₁₀) and observe any differences in concentration and morphology throughout the year at industrial zone of Toluca Valley. We monitored at 12 sites in an area of approximately 17 square kilometres, over a year. The surveys were conducted every 3 days. For sampling and gravimetric determination we followed the USEPA method IO.2.1. The highest concentrations were observed in sections 6, 7, 8 and 9 that correspond to the period of drought, while less frequently out of the standard occurred in spring 2005 as well as summer 2006. Comparisons between the mean comments from the autumn-winter seasons (AW, dry season) and spring-summer (SS, rain), showed statistical differences between categories compared (confidence interval of 95%). For the morphology of particles we used scanning electron microscopy (SEM) and through analysis of individual particles there were no differences in the morphology of particles between periods. In conclusion there is a marked difference in temporary behaviour concentrations of PM₁₀.

*autor para la correspondencia:
tel. 7222087236; fredy_12_2000@yahoo.com.mx

(particulas smaller than 10 micrometers) at industrial zone of Toluca Valley.

Key words: PM₁₀, SEM, particles morphology, temporal analysis.

RESUM

En la ciutat de Toluca existeix preocupació pels nivells de concentració de partícules que s'han donat en els darrers anys, els quals han arribat a rebassar la norma ambiental. Tanmateix, els estudis enfocats a partícules són escassos. A més, cal tenir en compte que en aquesta zona no només hi viuen 1,2 milions d'habitants, sinó que també s'ubiquen en ella els complexos industrials "Toluca-Lerma" i "Toluca 2000", així com set parcs industrials i un parc de vehicles de més de 260 mil unitats.

L'objectiu d'aquest estudi és analitzar el comportament temporal de la fracció respirable de partícules (PM₁₀) i observar les possibles diferències en la seva concentració i morfologia al llarg de l'any en la zona industrial de Toluca. Es fa la monitorització en 12 llocs en una àrea aproximada de 17 kilòmetres quadrats durant un any. Els mostrejos es realitzaren cada 3 dies. Per al mostreig i la determinació gravimètrica es segueix el mètode USEPA IO.2.1. Les majors concentracions s'observen en els punts 6, 7, 8 i 9, que corresponen al període d'estiatge, mentre que la norma es superà amb menor freqüència durant la primavera-estiu tant de 2005 com de 2006. Les comparacions de mitjanes entre les observacions de les estacions tardor-hivern (OI, estiatge) i de primavera-estiu (PV, pluges) mostren diferències estadístiques entre les categories comparades (interval de confiança del 95%). Per a la morfologia de partícules, s'utilitza microscòpia electrònica d'escombratge (MEB), i s'observa mitjançant l'anàlisi de partícules individuals que la morfologia de les partícules no presenta diferències entre els períodes PV i OI. En conclusió, existeix una marcada diferència en el comportament temporal de les concentracions de PM₁₀ (partícules inferiors a 10 micròmetres) en la zona industrial de la Vall de Toluca.

Mots clau: PM₁₀, MEB, morfologia de partícules, anàlisi temporal.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Toluca, en el estado de México, experimenta un acelerado desarrollo económico e industrial que trae como consecuencia el aumento de los niveles de contaminación y el deterioro de la calidad del aire, alcanzando concentraciones que pueden llegar a sobrepasar los límites máximos permisibles (Cuellar y Beltrán, 2003).

La región, además tiene un clima templado y condiciones meteorológicas en invierno propicias para presentar altas concentraciones de partículas suspendidas (PS) en la atmósfera. En estas condiciones, las PS constituyen uno de los problemas de contaminación más frecuentes, al ser escasos los mecanismos naturales para mantener la humedad en los suelos y para limpiar la atmósfera.

Estudios epidemiológicos han observado una ligera relación de efecto agudo entre las partículas en el aire y mortalidad cardiopulmonar (Ségala et al., 2001). Así mismo, parece que no todos los tipos de partículas son igualmente perjudiciales para la salud, las de diámetro aerodinámico menor a 10 µm (PM₁₀), han demostrado ser particularmen-

te peligrosas (Marcazzan et al., 2003). Aún dentro de esta categoría, el tamaño de las partículas es muy variable, yendo desde 0,001 hasta 10 micrómetros.

Los estudios enfocados en la contaminación por PS en la ciudad de Toluca han sido escasos (Delgado, 2002; Ramírez, 2004), por lo que el presente trabajo ayudará a mejorar este conocimiento, estudiando el comportamiento temporal de las PM₁₀ y observando las posibles diferencias en su concentración y morfología a través del año 2005-2006.

La composición elemental de las partículas es importante en los estudios enfocados a las PS, debido a su composición, por ejemplo el Cu (cobre) es un inhibidor del crecimiento de plantas (Novoa, 2005), el plomo (Pb), es un metal peligroso para la salud, ya que provoca anemia, convulsiones y desarrollo cognitivo deficiente en niños y adultos, entre otras enfermedades (Matte, 2003).

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de Estudio. La ciudad de Toluca se ubica en el centro del Estado de México, en los 19° 16' 12,6" de latitud norte y los 99° 35' 42,9" de longitud oeste. Tiene una temperatura promedio anual de 13,7° C. Su clima es templado sub húmedo, la precipitación media anual varía de 1000 a 1200 mm. Las heladas son de 80 a 140 días en la época fría.

Sitios de Muestreo. Los muestreadores pasivos de PM₁₀ se ubicaron en doce puntos en una misma zona acotada al sur por Av. Paseo Tollocan, al norte con calle Minería, al oeste con Av. Alfredo del Mazo y al este con Boulevard Aeropuerto.

Equipos. El muestreo se realizó con equipos de bajo volumen (Low Vol), con cabezal PM₁₀ a un flujo de 5 L/min (0,3 m³/h durante 24 horas, promedio; flujo ajustado por presión y temperatura promedio del día muestreado).

La calibración se efectuó en campo con manómetro digital Mark III S-475. Para el pesaje de los filtros se utilizó una balanza analítica con sensibilidad de 0,1 mg Sartorius, las muestras se dejaron dentro de un cuarto semi hermético, con temperatura y humedad controladas, durante 24 horas, antes y después de cada muestreo.

Para la obtención de imágenes de las partículas se utilizó el microscopio electrónico de barrido Jeol JSM 5900LV de bajo vacío, con detector de electrones retro dispersados, calibrado con rejilla de cobre (Cu) a 20 kV a una distancia de 1 cm. Se obtuvieron imágenes mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) entre 5000 a 10000X para la identificación elemental en partículas individuales utilizando energía dispersiva.

Materiales. Como medio de captura para las muestras se utilizaron filtros de 46,7 mm de diámetro de teflón anillados (Whatman 7592-104).

Procedimientos. El procedimiento seguido para el muestreo y determinación gravimétrica fue el Método EPA IO.2.1 (EPA, 1999). Se acondicionaron los filtros por 24 h a una temperatura de 24± 2 °C y una humedad relativa de 45± 5%.

El calendario EPA (2004), recomienda realizar muestreos cada 6 días, para mayor precisión en este estudio se realizaron muestreos cada 3 días iniciando en primavera 2005

(01 de junio de 2005) hasta el verano 2006 (05 de agosto de 2006).

Análisis Estadístico. Los métodos estadísticos empleados para el análisis de los datos fueron series de tiempo, pruebas de t de Student para comparación de medias. Para estos análisis se utilizó el programa estadístico Stat Graphics versión 5,1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis estadístico se agruparon en cada sitio los resultados de concentración de PM_{10} de las estaciones de otoño e invierno (OI) y los de primavera y verano (PV), las cuales son climatológicamente muy similares en la zona de estudio.

Estaciones del año. Las concentraciones de PM_{10} promedio en OI es mayor que en PV y en algunos casos, rebasan hasta el triple la concentración de salud ambiental que establece la norma mexicana en OI, en la Tabla I se presentan algunos datos estadísticos, en donde n representa el número de muestreos, media es el promedio de esas observaciones en $\mu g/m^3$ y DE, es la desviación estándar de el conjunto de datos observados en $\mu g/m^3$.

Tabla I. Parámetros estadísticos de los valores de concentración de PM_{10} ($\mu g/m^3$) por temporada

Temporada	N	Media	DE
PV-	43	68,63	27,62
OI-	68	135,58	72,81
PV	59	71,12	34,29

Morfología. Se observó la morfología de 50 partículas individuales de algunas muestras colectadas. Estas partículas presentaron de manera general composiciones elementales muy definidas. Las partículas ricas en carbón (> 50%) con morfología esférica. Las partículas con contenidos de elementos metálicos son generalmente de tamaño fino (0,5-2 μm), pero también se observaron en el intervalo de 2,5 y 10 μm , es decir la moda gruesa. La morfología de estas partículas puede ser esférica o amorfa (Figura 1).

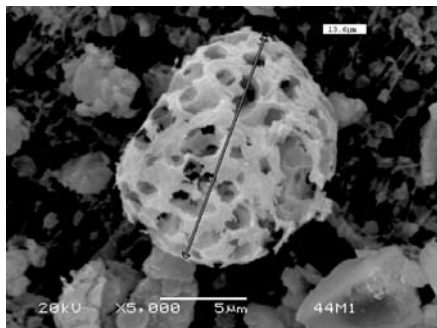


Figura 1. Imagen de una partícula porosa amorfa con alto contenido elemental de carbón.

traron diferencias entre las concentraciones gravimétricas de PM_{10} entre OI y PV (Figura 3), eliminando lo reportado por Parra (2005) en el sentido de que las diferencias entre los promedios de las categorías son muy pequeñas, con desviaciones estándar muy grandes.

Este comportamiento puede deberse a la gran variabilidad diaria en las concentraciones de PM_{10} observadas en todos los sitios a lo largo del período de muestreo (Figura 4), relacionada a una posible variación en los niveles de emisión de las fuentes.

Los niveles de concentración de partículas en la atmósfera parecen obedecer a los niveles de actividad humana en las áreas de influencia del monitoreo y las condiciones climáticas de corto plazo, así como a las tendencias estacionales.

Al respecto de los criterios de protección a la salud de la población, la Norma de Salud Ambiental NOM-025-SSA1-1993 (SSA, 1994) establece el límite de 50 $\mu g/m^3$ de PM_{10} como promedio anual, y 120 $\mu g/m^3$ para promedio de 24 horas.

Los resultados indican que las concentraciones de PM_{10} tienen mayor variación temporal que espacial, esto puede deberse a la cercanía de los puntos de muestreo entre uno y otro y a la predominancia de los vientos de sur a norte presentando consistentemente concentraciones mayores gravimétricas de PM_{10} en OI.

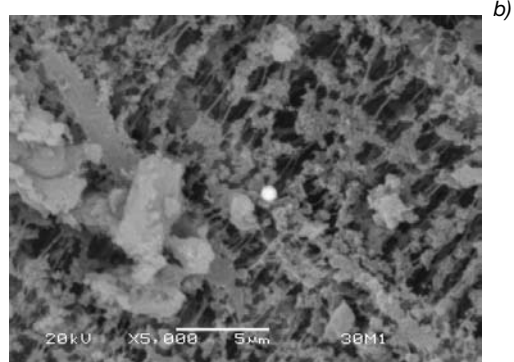
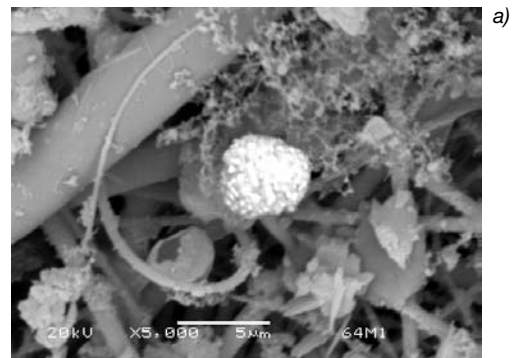


Figura 2. Imagen de partículas metálicas (a) amorfa con contenido de Cr y Pb, (b) esférica con contenido de Fe, Pb y Cu.

DISCUSIÓN

Al igual que otros autores en otros países (Bergametti et al., 1989; Brook et al., 1997; Marcazzan, 2003), se encon-

En la Tabla II, se observa la composición elemental de las partículas mostradas en la Figura 2 a), y Figura 2 b), en donde la partícula de la Figura 2 a) y 2 b), muestra un porcentaje de 34,92343 % W y 26,14784 %W de plomo (Pb)

correspondientemente, lo cual representa un valor importante de composición para las mismas, sabiendo que el Pb es uno de los metales pesados peligrosos a la salud humana.

Tabla II. Composición elemental de las partículas de la Figura 2.

Elemento	Figura 2. a) Composición elemental en %	Elemento	Figura 2. b) Composición elemental en %
Carbono	36,55	Carbono	34,76
Sodio	2,27	Flúor	32,15
Aluminio	2,25	Aluminio	0,89
Silicio	1,04	Silicio	2,56
Potasio	1,01	Calcio	0,62
Calcio	0,88	Hierro	0,73
Titanio	3,14	Cobre	2,13
Cromo	8,52	Plomo	26,15
Plomo	34,92		

Las partículas carbonosas observadas en todas las temporadas presentaron en su composición elemental uno o varios metales pesados (Ti, Pb, Cu, Zn, Fe) y morfología esférica (Figura 2). Una posible razón de la forma esférica es la fuente de emisión, partículas esféricas indican combustión u otro proceso realizado a alta temperatura (Zhu et al., 2005). Investigaciones realizadas por Funasaka et al. (2000), revelan que las partículas finas presentan mayor concentración de carbono en comparación con partículas gruesas. Otros autores han reportado que partículas de alto contenido de carbono se asocian a actividades industriales y que la mayor concentración de este tipo de partículas se observan en el foco de emisión (Conner et al., 2001).

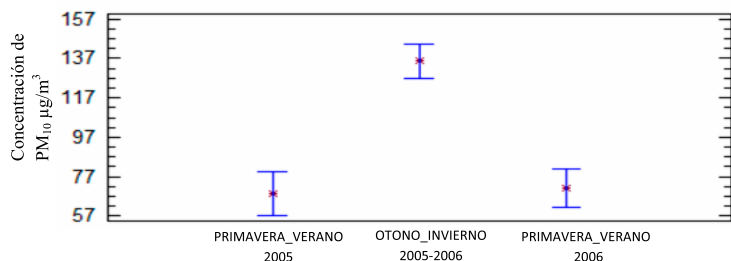


Figura 3. Intervalos de confianza en la comparación de medias de concentración de PM_{10} entre la primavera-verano y el otoño invierno.

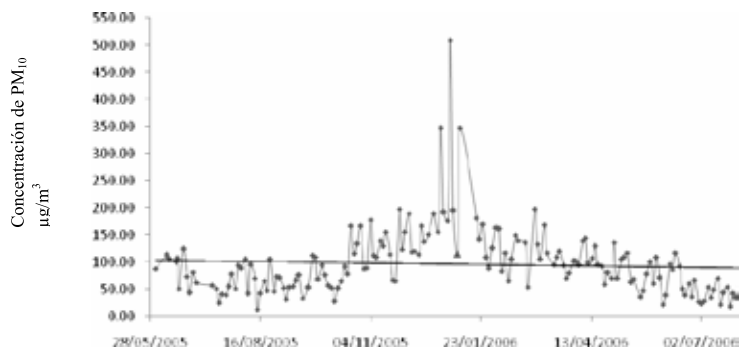


Figura 4. Serie de tiempo de las concentraciones de PM_{10} observadas en ZMVT (junio de 2005 - agosto de 2006).

Las partículas metálicas presentaron en todas las temporadas morfologías tanto esféricas como amorfas, se considera son generadas por la acumulación de partículas de tamaño de 0,050 a 0,2 μm .

El análisis de partículas individuales no mostró una influencia del cambio estacional con respecto a la composición elemental (análisis EDS) y morfología (imágenes MEB) de las mismas. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Campos (2006), el cual sugiere que las variaciones climatológicas de las diferentes estaciones del año no afectan la composición del PM_{10} . Es posible que a causa de los fenómenos meteorológicos tales como inversión térmica, precipitación y velocidad del viento, la distribución temporal de concentración de partículas si resulte afectada, no así la composición elemental de las mismas.

CONCLUSIONES

Las concentraciones de PM_{10} presentan una marcada variación diaria en la ciudad de Toluca, esta se encuentra relacionada a la época del año. No se observó una influencia temporal en la morfología de las partículas. Los resultados indican que no existe una marcada variación espacial de las concentraciones de PM_{10} , esto pudo deberse a la cercanía entre los puntos de muestreo. La temporada de secas o estiaje (OI), es la temporada del año en donde se presentan con mayor frecuencia concentraciones arriba del límite ambiental de salud y de acuerdo a la NOM-025-SSA1-1993 que establece una concentración a la salud ambiental de 120 $\mu g/m^3$ promedio en 24 horas de muestreo, claramente puede observarse valores peligrosos de hasta 500 $\mu g/m^3$, esto puede ser debido a las condiciones climáticas del sitio que permite mayor movimiento de partículas PM_{10} en esta temporada.

La composición de las partículas PM_{10} , es referencia del potencial peligro que representan, un ejemplo claro es el plomo el cual fue encontrado en algunas partículas de este estudio, así como el cobre y el hierro. El plomo es generador de enfermedades debido que es bioacumulable en órganos blancos (Matte, 2003) y el cobre es un inhibidor del crecimiento de plantas (Novoa, 2005).

BIBLIOGRAFÍA

- Bergametti, G., Dutot A.L., Buat-Ménard P., Losno R., y Remoudaki E., 1989. Seasonal variability of the elemental composition of atmospheric aerosol particles over the northwestern Mediterranean. *Tellus*, 41B: 353-361.
- Brook, J.R., Dann T.F. y Burnett R.T. (1997). The relationship among TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$, and inorganic constituents of atmospheric particulate matter at multiple Canadian locations. *Journal of Air and Waste Management Association*. 47: 2-19.
- Campos, A. 2006. Evaluación de partículas atmosféricas PST y PM_{10} en la Ciudad de Chihuahua México: niveles de concentración, composición elemental e identificación de fuentes emisoras. *Disertación Doctoral*. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México.
- Conner, T. L., Norris, G. A., Mathew, S. L. y Williams, R. W., 2001. Individual particle analysis of indoor, out-

- door, and community samples from the 1998 Baltimore particulate matter study. *Atmospheric Environment*. 35: 3935-3946.
5. Cuellar R. F. y Beltran V. A., 2003, Caracterización de partículas metálicas presentes en muestras de material particulado aerotransportado de la ciudad de Toluca (Zona norte y centro), Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Toluca.
 6. Delgado M., 2002. Estudio Correlativo de la Concentración de Elementos Tóxicos con el Tamaño de Partícula. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Chihuahua, México.
 7. EPA. U.S. Environmental Protection Agency, 1999. Compendium Method IO-2.1. Sampling of ambient air for total suspended particulate matter (SPM) and PM₁₀ using high volume sampler. EPA/625/R-96/010a. Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air. Center for Environmental Research Information. Washington D.C.
 8. EPA. U.S. Environmental Protection Agency, 2004. AMTIC sampling schedule calendar. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttn/amtic/calendar.html>.
 9. Funasaka, K., Miyazaki, T., Tsuruho, K., Tamura, K., Mizuno, T., y Kuroda, K. 2000. Relationship between indoor and outdoor carbonaceous particulates in roadside households. *Environmental Pollution*. 110: 127-134.
 10. Marcazzan, G.M., Ceriani M., Valli G., y Vecchi R., 2003. Source apportionment of PM₁₀ y PM_{2.5} in Milan (Italy) using receptor modeling. *The Science of Total Environment*. 317:137-147.
 11. Matte, D. Thomas, 2003, Efectos del plomo en la salud de la niñez, *Salud Publica de México* 2003, Vol. 45(2):220-224.
 12. Novoa, Valiñas et al., 2005, Evaluación de la citotoxicidad del cobre y del lindano en cultivos de células CHO-K1, *Revista Toxicología*, ISSN 1697-0748.
 13. Parra, J., 2005. Tendencias diarias de los contaminantes criterio (CO, NO₂, O₃, SO₂, PM₁₀) en la Ciudad de Chihuahua. Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Durango, Durango, México.
 14. Ramírez, E., 2004. Determinación de sulfatos y nitratos y su distribución con el tamaño de partícula en aire ambiente de la ciudad de Chihuahua. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Chihuahua, México.
 15. Ségala, W. C., Dor F., Festy B., Lameloise P., Le Moullec Y., Le Tertre A., Médina S., Quénel P., Wallaert B., y Zmirou D., 2001. Air pollution and health: Correlation or causality? The case of the relationship between exposure to particles and cardiopulmonary mortality. *Journal of Air and Waste Management Association* 51:220-235.
 16. SS. Secretaría de Salud. 1994. NOM-025-SSA1-1993. Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, partículas menores a 10 micras (PM₁₀). Valor Permisible para la concentración de partículas menores a 10 micras (PM₁₀) en el aire ambiente como medida para la protección a la salud de la población. *Diario Oficial de la Federación* del 23 de diciembre de 1994.
 17. Zhu, Y., Hinds, W.C., Krudysz, M., Kuhn, T., Froines, J., Sioutas, C., 2005. Penetration of freeway ultrafine particles into indoor environments. *Journal Aerosol Science*. 36: 303-322.

NOMENCLATURA

- Cr. Símbolo del elemento cromo.
 Cu. Símbolo del elemento cobre.
 EDS. Siglas en inglés de escaneo mediante electrodispersión.
 Fe. Símbolo del elemento hierro.
 MEB. Siglas de microscopia electrónica de barrido.
 OI. Representa el periodo otoño- invierno.
 Pb. Símbolo del elemento plomo.
 PM₁₀. Material particulado suspendido de tamaño de diámetro aerodinámico 10 micrómetros.
 PS. Partículas suspendidas.
 PV. Representa el periodo primavera- verano.
 SSA. Secretaria de salud de México.
 Ti. Símbolo del elemento titanio.
 ZMVT. Zona Metropolitana del Valle de Toluca.
 Zn. Símbolo del elemento zinc.
 mm. Milímetros.