Las Partículas Respirables PM₁₀ y su Composición Química en la Zona Urbana y Rural de Mexicali, Baja California en México

Miguel Á. Canales-Rodríguez⁽¹⁾, Margarito Quintero-Núñez^{(2)*}, Telma G. Castro-Romero⁽³⁾, Rafael O. García-Cuento⁽²⁾
Universidad Autónoma de Baja California, (1) Programa Doctorado en Ciencias del MYDCI, (2) Instituto de Ingeniería. Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal s/n Col. Insurgentes Este, (21280) Mexicali, Baja California, México. (e-mail: miguelcanales13@hotmail.com, maquinu@uabc.edu.mx, rafaelcueto@uabc.edu.mx)
(3) Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Av. Universidad # 3000 Col. Copilco universidad (04510) Del. Coyoacán, Distrito Federal, México (e-mail: telma@atmosfera.unam.mx)

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia.

Recibido Feb. 26, 2014; Aceptado May. 13, 2014; Versión final recibida Jun. 13, 2014

Resumen

El objetivo de este trabajo es la caracterización química de las partículas PM₁₀ para las temporadas de invierno y verano en la zona urbana y rural de Mexicali. Las muestras fueron tomadas con equipos de bajo volumen cada dos días con dos tipos de filtro, de cuarzo y de teflón. Los filtros fueron analizados por gravimetría, 38 metales (Na a Pb) por análisis de dispersión de rayos x, aniones (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) y cationes (Na⁺, K⁺, NH₄⁺) por cromatografía de iones, y carbón orgánico y elemental por transmitancia térmica-óptica. Se excedió la norma mexicana, que es de 120 µg m⁻³ promedio en 24 horas, por 27 veces en la temporada de invierno y por 15 veces en la temporada de verano. Las especies dominantes durante la temporada de verano fue el material geológico y en la temporada de invierno fue el carbón orgánico. Se concluye que la zona urbana es la más contaminada en la temporada de verano, mientras en invierno es la zona rural.

Palabras clave: material geológico, material orgánico, PM₁₀, carbón orgánico, carbón elemental

Chemical Composition of Inhalable Particles PM₁₀ in the Urban and Rural Area of Mexicali, Baja California in México

Abstract

The objective of this research is the chemical characterization of the PM₁₀ for the winter and summer seasons in the urban and rural zones of Mexicali. The samplings were realized every other day, using low volume samplers with two types of filters, quartz and teflon. The filters were analyzed for total mass by gravimetry, 38 metals (Na to Pb) by X rays spectroscopy analysis, anions (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) and cations (Na⁺, K⁺, NH₄⁺) by ions chromatography, and organic and elemental carbon by thermal optimal transmittance. During the winter season the Mexican norm which is 120 µg m⁻³ averaged for 24 hours, was exceeded by 27 times, meanwhile in the summer season the norm was exceeded by 15 times. In the summer season the geological material predominated while in the winter was the organic material the predominant one. It is concluded that the urban zone was the most polluted in the summer and in the rural was more polluted in the winter.

Keywords: geologic material, organic material, PM₁₀, organic carbon, elemental carbon

INTRODUCCIÓN

Las PM₁₀ o partículas gruesas (PM_{10-2.5}) también llamadas partículas inhalables, son las partículas menores a 10 micrómetros pero más grandes que 2.5 micrómetros de diámetro, se consideran como contaminantes constituidos por material líquido y sólido de muy diversa composición y tamaño, que se encuentran en el aire (Tzintzun *et al.*, 2005) y pueden ser generadas tanto por fuentes móviles como estacionarias, de manera natural o antropogénica (Villalobos *et al.*, 2008). Se asocian generalmente a la combustión no controlada, algunas están relacionadas con la desintegración mecánica de la materia o la re-suspensión de partículas en el ambiente (Echeverri y Maya, 2008). Esto incluye procesos de combustión en vehículos, principalmente aquellos que usan diesel, industrias de fundición, pinturas, cerámica y plantas de energía (Tzintzun *et al.*, 2005). Se ha establecido que las partículas se encuentran constituidas por 7 componentes químicos o especies: material geológico, sulfatos de amonio, nitratos de amonio, material orgánico, carbón elemental, sales y elementos trazas (Chow y Watson, 1997; Viana y Salas, 2003). El tiempo que las partículas permanecen suspendidas en el aire dependen principalmente de su tamaño. El tamaño de las partículas se define por su diámetro aerodinámico y la distribución granulométrica de este tipo de partículas una vez emitida es relativamente constante (Alfaro *et al.*, 1998).

Se puede afirmar que hay evidencia científica que correlaciona la exposición al material particulado atmosférico con diversos efectos a la salud (Viana y Salas, 2003; Bascom *et al.*, 1996; Künzli *et al.*, 2000). Estos estudios epidemiológicos demuestran que la exposición a diferentes contaminantes ambientales, incluso a niveles por debajo de la normas internacionales y nacionales, se asocian con un incremento en la incidencia de asma, severidad en el deterioro de la función pulmonar, así como mayor gravedad en la presentación de las enfermedades respiratorias de niños y adolescentes (Romero *et al.*, 2006; Querol, 2008), además de síntomas comunes como la irritación ocular, tos, malestar en garganta y dolor de cabeza (Muñoz *et al.*, 2005). Otros efectos son daños a la economía por costo de enfermedades (Ceballos y Melgar, 2005), daños a la vegetación, reducción de la visibilidad (Watson y Chow, 2006), lluvia ácida (Querol, 2008) daño a los animales y fotosíntesis de las plantas (Alcalá *et al.*, 2008).

Mexicali ocupa uno de los primeros lugares en contaminación por PM₁₀ en el país, lugar que se disputa con la zona metropolitana del Valle de México (Zuk *et al.*, 2007). Para Meza *et al.* (2010) las causas de esta contaminación proviene del polvo de las avenidas pavimentadas y en especial las no pavimentadas. Se han realizado mediciones desde el año de 1997, en donde las evaluaciones de 1997 a 1999 mostraron que se rebasaron en más de 20 ocasiones los límites establecidos por la NOM-025-SSA donde se establece que el valor permitido para 24 horas es de 120 µg/m³, mientras anualmente la norma establece 50 µg/m³, y que se ha violado en más de 40 veces de 1999 a 2008 (SPA *et al.*, 2011). También se cuenta con datos de PM_{2.5} de la estación de monitoreo de la UABC pero estos presentan fallas e interrupciones a lo largo de los diferentes años que se tiene contemplados que van desde el 2003 al 2008, siendo el año 2004 el más completo y en donde se mantuvo por encima de la NOM-025-SSA en más de 50 veces. La mayoría de las investigaciones realizadas en la ciudad de Mexicali muestran a la temporada de otoño-invierno como la más crítica (Chow *et al.*, 2000; Mendoza y Pardo, 2005) ya que es en estos meses donde se presentan los días con mayor grado de contaminación (Katzman *et al.*, 2010), sobre todo en el mes de diciembre y enero, donde la contaminación es más relevante. Los mayores niveles de contaminación se notan los días 12 de Diciembre en otoño, 25 de diciembre y 1 de enero en Invierno (Mendoza y Pardo, 2005). Esto no significa que los días intermedios sean limpios, al contrario se ha notado que se mantiene la contaminación debido a las inversiones térmicas y al poco flujo de viento que provoca que este no se disperse. El objetivo de la investigación es llevar a cabo la caracterización química de las PM₁₀ para las temporadas de invierno y verano en la zona urbana y rural de Mexicali.

MATERIALES Y METODOS

Ubicación y descripción geográfica.

Mexicali, es la capital del estado de Baja California, con una población de 936,826 habitantes (INEGI, 2010). Se caracteriza por poseer un clima de tipo seco (B) y subtipo muy seco semicálido, con lluvias de invierno cuya frecuencia es menor a 36% (Rodríguez, 2002) con un promedio anual de lluvia de 75 mm (García *et al.*, 2007), y una temperatura media anual de 21.4°C (Camargo y García, 2012), con máximas de 50°C en los meses de verano y cercanas a los 0°C en los meses de invierno (García *et al.*, 2009), a una altura de 11 metros sobre el nivel del mar.

Sitios de muestreo

El trabajo se realizó en dos sitios de muestreo teniendo en cuenta sus características ambientales: La zona urbana tuvo como sede al Instituto de Ingeniería en Mexicali (32.631183°N, 115.444803°W), el cual se

encuentra cercano al boulevard Benito Juárez; para la zona rural se sitió en una vivienda particular cercana al poblado Guadalupe Victoria (32.262568°N, 115.083539°W) donde los caminos están sin pavimentar, ya que este lugar es de muy bajo tránsito vehicular local pero rodeado de campos de cultivos, a 43 kilómetros de la ciudad de Mexicali (Fig. 1). Se colocaron dos monitores tanto en la zona urbana como en la zona rural. Las muestras de PM₁₀ fueron recolectadas con muestreadores de bajo volumen minivol airmetrics (5 L/min), calibrados al principio y mitad de cada muestreo, donde se utilizaron dos tipos de filtros de 47 mm de diámetro marca Whatman con poros de 2 µm: teflón y cuarzo. Para realizar el análisis gravimétrico, los filtros a usar fueron ambientalizados en un desecador por 24 horas y pesados en una micro balanza tanto antes como después del muestreo, en un laboratorio con condiciones óptimas de humedad relativa (30 – 40%) y temperatura (promedio de 20 – 23°C).

Fig. 1: Sitios de muestreo localizados en la zona urbana (Mexicali) y rural (Guadalupe Victoria)

Se realizaron muestreos por dos temporadas, en invierno del 7 de Enero al 8 de Febrero del 2011 y verano del 7 de Agosto al 6 de Septiembre del 2011 para el hemisferio norte. Los tiempos de muestreo presentados en esta investigación son aún mayores al de otros artículos que hablan sobre este mismo tema, como en el caso de Mendoza y Pardo (2005) y de Chow *et al.* (2000), ambos menores a un mes. El muestreo tuvo una duración de 24 horas, cada tercer día se hacía la colección de muestras. Para la campaña de invierno se tomaron 32 muestras (16 con el filtro de teflón y 16 con el filtro de cuarzo) para la zona urbana y para la zona rural, mientras en la temporada de verano se tomaron 34 muestras (17 con el filtro de teflón y 17 con el filtro de cuarzo) para la zona urbana y para la zona rural, dando como resultado 66 muestras. El cálculo de la concentración de PM₁₀, se realizó a partir de información obtenida gravimétricamente y de variables ambientales presentes en la toma de muestras (presión atmosférica y temperatura ambiental), tomadas cada 5 minutos de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) para la zona urbana y cada 5 minutos de una estación meteorológica móvil prestada por el Instituto de Ingeniería y apostada en el ejido Guadalupe Victoria, en el Valle de Mexicali, Baja California.

A los filtros de teflón se les determinó la masa (gravimetría) mediante una micro-balanza sartorius ME-S-F (capacidad hasta 1 µg) y 38 metales (del Na al Pb) mediante espectroscopia de análisis de dispersión de rayos X (EDX) acoplado a un microscopio electrónico de barrido (MEB) JEOL 6060, mientras a los filtros de cuarzo se les determinó cationes (Na⁺, K⁺, NH₄⁺) y aniones (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) mediante cromatografía de iones, utilizándose un equipo IonPac AS9-HC. La concentración de carbón orgánico y carbón elemental se analizó mediante transmitancia térmica-óptica por espectroscopia de absorción atómica electrotérmica mediante el equipo Perkin-Elmer modelo 2100.

RESULTADOS

Concentración de PM₁₀

Se llevó a cabo un análisis de las series de tiempo de las concentraciones de las PM₁₀ para la temporada de invierno (Fig. 2), tomando en cuenta la norma mexicana para PM₁₀ cuyo su límite es de 120 µg/m³. Para la zona urbana hubo en total 12 violaciones (del 9 de enero al 23 de enero con un promedio de 137.82 µg/m³, 27 de enero con 146.39 µg/m³, 2 de febrero con 152.21 µg/m³, 6 de febrero con 146.79 µg/m³ y 8 de febrero

con $163.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Mientras que para la zona rural hubo en total 15 violaciones (del 7 de enero al 17 de enero con un promedio de $139.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, del 21 de enero al 4 de febrero con $160.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el 8 de febrero con $159.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Fig. 2: Concentración de PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) por días en la temporada de invierno

Fig. 3: Concentración de PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) por días en la temporada de verano

Para la temporada de verano (Fig. 3) en la zona urbana se evaluaron 8 violaciones (el 11 de agosto con $126.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, del 17 al 25 de agosto con un promedio de $126.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 29 de agosto con $160.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y 2 de septiembre con $151.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Mientras para la zona rural se tuvieron en total 7 violaciones (9 de agosto con $123.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 17 de agosto con $147.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el 23 de agosto con $146.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 27 de agosto con $128.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$, del 31 de agosto al 2 de septiembre con un promedio de $134.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y 6 de septiembre con $137.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Análisis químico

Los componentes químicos o especies se clasificaron como material geológico (MG), materia orgánica (MO), carbón elemental (CE), nitrato de amonio (NH_4NO_3), sulfato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, elementos trazas (ET), sales minerales (sales). El material geológico se estimó como $1.89 \times \text{Al} + 2.14 \times \text{Si} + 1.4 \times \text{Ca} + 1.43 \times \text{Fe}$, la materia orgánica se estimó como 1.2 veces el carbón orgánico, el carbón elemental como 1 vez el carbón elemental, el NH_4NO_3 como 1.29 veces el NO_3 , el $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ como 1.375 el SO_4^{2-} , los elementos traza fueron todos aquellos elementos contenidos en la tabla periódica que va desde el Na al Pb, excepto Al, Si, Ca, Fe, Cl, K, Na, S y por último las sales se calcularon como $1.65 \times \text{Cl}$ (Chow *et al.* 1997). En la temporada de invierno, para la zona urbana se muestra como mayoritario la alta cantidad de material orgánico debido a los asaderos al carbón, actividades de construcción, quema de residuos de madera y residuos domiciliarios muy característicos de la época, además se muestra una apreciable contaminación por actividades naturales y antropogénicas debido a las grandes cantidades de material geológico (provocado por los caminos sin pavimentar, terrenos baldíos, trituración del polvo por acción del tráfico y material proveniente del desierto), por último podemos presuponer una alta contaminación de carbón elemental debido a la ineficiencia de los motores de los autos (Fig. 4).

Fig. 4: Contribución promedio (%) de las especies en PM₁₀ para la zona urbana en la temporada de invierno

Mientras para la zona rural la mayor contaminación se ve en el material geológico debido a la erosión del suelo provocado por el viento, caminos sin pavimentar, terrenos usados para la cría de ganado, en el material orgánico tenemos la quema de residuos de los campos de cultivos (esquilmos), ladrilleras, quema de residuos de madera y residuos de basura domiciliaria y por último la contaminación por carbón elemental producida por los automotores (Fig. 5). Se observó una muy pequeña cantidad de sulfatos y nitratos en las dos zonas de estudio, provenientes del mar o de la salinidad del agua de Río Colorado. En la temporada de verano, se ve un aumento gradual del material geológico para la zona urbana producto del polvo proveniente del desierto, de la gran cantidad de caminos sin pavimentar y lotes baldíos, propiciando que esta fuente sea la principal para esta temporada de estudio; esto provoca que se vea una reducción del material orgánico debido a una disminución en la quema de quema de madera y basura domiciliaria, debido a las altas temperaturas en los meses de verano. Por último se ve un descenso de carbón elemental, posiblemente propiciado por el menor uso de automotores; el sulfato de amonio se mantiene en los mismos niveles que en la temporada anterior (Fig. 6).

En cambio para la zona rural de la temporada de verano, se mantienen los niveles en la mayoría de los contaminantes con respecto a la misma zona pero en la temporada de invierno, solo se ven unos leves aumentos de los nitratos y sulfatos de la región debido a la fumigación de los campos de cultivos. Tomando en cuenta eso, podemos suponer que el contaminante mayoritario es el material geológico por las mismas razones ya explicadas anteriormente, en segundo lugar el material orgánico y por último el carbón elemental (Fig. 7). Estos cambios de origen de la fuente de contaminación dan a entender que las actividades antropogénicas disminuyen, aumentando aquellas de origen natural.

Fig. 5: Contribución promedio (%) de las especies en PM₁₀ para la zona rural en la temporada de invierno

Fig. 6: Contribución promedio (%) de las especies en PM₁₀ en la zona urbana en la temporada de verano

Fig. 7: Contribución promedio (%) de las especies en PM₁₀ en la zona rural en la temporada de verano

Estos cambios de origen de la fuente de una temporada a otra indica que se deben de atacar los problemas de forma diferente en cada período, debido a que solo se logra percibir dos temporadas de clima en esta región: invierno y verano, razón de más para intentar crear programas para la disminución de la contaminación como la reducción del uso de la leña (madera) para la cocción de comida en las casas; instalación de filtros en negocios locales como las rosticerías y taquerías (asaderos al carbón), la implementación de la verificación vehicular, el impulso a programas de educación ambiental, la pavimentación de avenidas principales, construcción de parques, y la creación de escudos verdes en zonas al sur, este y oeste de la zona metropolitana.

Análisis Estadístico

Para encontrar similitudes del origen del material particulado entre la zona urbana y rural en las dos temporadas de muestreo se obtuvieron las diferentes correlaciones en las dos zonas seleccionadas. En la regresión múltiple dada en la temporada de invierno, no muestra una correlación alta. Así se observó la zona urbana versus la zona rural donde se tiene una r de .0888. Para la correlación de la temporada de verano al igual que en la temporada de invierno se obtuvieron correlaciones bajas. Esto se observa en la zona urbana versus la zona rural, donde se obtuvo una r de .1514. Lo cual indica que no hay transportación de material particulado entre zonas de muestreo, dando a entender que la contaminación entre estas dos zonas es local.

DISCUSIÓN

Según la norma Mexicana diaria para PM₁₀ (120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), los valores más altos de PM₁₀ en invierno se dieron en la zona rural, mientras que en verano fue en la zona urbana. Tomando en cuenta estudios previos de otoño-invierno de Mendoza y Pardo (2005) y Chow *et al.* (2000), además de Chow *et al.* (1997) en verano, se describe que la mayor cantidad de violaciones a la norma mexicana se da en la zona urbana; Mientras que en el Pro-Aire 2011-2020 (SPA *et al.*, 2011) se describe que del 2006 al 2009 se ha mantenido constantes los niveles de PM₁₀, razón por lo cual Mexicali es considerada como una de las ciudades más contaminadas de México. Cabe destacar que hasta el momento no se ha realizado ninguna investigación al respecto en la zona rural de Mexicali. Para la temporada de invierno, la mayoría de los datos tomados para las dos zonas en estudio presentaban niveles más altos que la norma Mexicana para 24 horas. En total se presentaron 27 violaciones durante los muestreos (12 para la zona urbana, 15 para la zona rural). Para Mendoza y Pardo (2005) fueron en total 7 violaciones a la norma en la zona urbana solo en otoño-invierno, los cuales no llevaron a cabo muestreo en la zona rural, para Chow *et al.* (2000) fueron en total 7 violaciones de 10 filtros usados, principalmente del 11 al 20 de diciembre (otoño-invierno).

En cuanto al número de violaciones a la norma para PM₁₀ en la temporada de verano se detectaron en total 15 (8 para la zona urbana y 7 para la zona rural), muy parecido a lo que obtuvo Chow *et al.* (1997) con un total de 23 violaciones de 24 filtros usados. Tomando el número de violaciones anuales a la norma Mexicana para PM₁₀, Zuk *et al.* (2007) mencionan las del año de 1997 al año de 2005, donde se obtuvieron el siguiente número de violaciones: 83 en 1997, 83 en 1998, 101 en 1999, 110 en el 2000, 89 en el 2001, 100 en el 2002, 91 en el 2003, 88 en el 2004 y 71 en el 2005. Mientras Quintero *et al.* (2011) mencionan las de los años del 2006 al año del 2008, donde se obtuvieron el siguiente número de violaciones: 89 en el 2006, 75 en el 2007 y 46 en el 2008. Dando a entender que el número de violaciones a la norma Mexicana ha disminuido del año de 2003 a la actualidad, sin que esto suponga una disminución de la contaminación en la ciudad de Mexicali.

Las razones de la diferencia de niveles de PM₁₀ del invierno al verano se debió principalmente a la reducción de la quema de madera, basura residencial, y otros desechos que se dan principalmente durante diciembre y enero, además de días festivos en la zona urbana y durante todo el invierno en la zona rural con la contribución de la quema de basura, ladrilleras y llantas, lo cual se ha hecho característico en esta región. Kelly *et al.* (2010), menciona como razones de aumento de PM₁₀, a la quema de residuos agrícolas (esquilmos) que se da muy comúnmente en la zona rural, de madera y de basura residencial en la zona urbana, a la operación de los asaderos de carbón, los caminos pavimentados y no pavimentados tanto en la zona urbana como zona rural de Mexicali, y a la deficiente combustión de los automóviles. En cambio Mendoza y Pardo (2005) mencionan que una de las causas de este aumento es debido a las fiestas decembrinas ya que se hace una quema indiscriminada de madera en fogatas, sobre todo en los días 12 de diciembre, 25 de diciembre y primero de enero. Chow *et al.* (1997), determinaron que para la temporada de verano la mayor parte de la contaminación por PM₁₀ provenía del suelo de la región, los automóviles, la quema de vegetación, las fuentes industriales, las plantas de energía, las productoras de vidrio y el aerosol marino, algo no tan alejado de lo que se muestra en esta investigación, donde la mayor parte de la contaminación procede del suelo de la región, de la quema de residuos agrícolas y de los automóviles.

Lo anteriormente mencionado se corrobora por los resultados que se obtuvieron en la caracterización química de las muestras donde la mayor parte de la contaminación provino del material geológico, un 31.08% en invierno y un 75.48% en verano, ambas para la zona urbana, un poco divergente a lo encontrado por Chow *et al.* (2000) de 70% para el invierno y de alguna manera un poco más alta a la presentada por Chow *et al.* (1997) de 56.54% para el verano. Esto también se contrapone a lo encontrado por Mendoza y Pardo (2005) de un 8%, el cual provenía de material geológico en el otoño-invierno. En su trabajo reportaron para el muestreo en noviembre y diciembre, que el 56% de la contaminación procedía casi totalmente de material orgánico (quema de madera); en el caso de este trabajo de investigación el material orgánico reportado fue de 54.52% para la temporada de invierno. Para Chow *et al.* (2000) en invierno solo procedía el 26.52% de este tipo de fuente y en verano para Chow *et al.* (1997) procedía el 25.7%, mientras en nuestra investigación fue de 15.81%.

En el caso del carbón elemental se reportó para el invierno un 9.99%, mientras para verano con un 5.77%, muy cercano al 10% de Mendoza y Pardo (2005) y un poco más bajo que el reportado por Chow *et al.* (2000) que fue de 12.9% ambos para invierno, en cambio para verano se tuvo un 2.9% de Chow *et al.* (1997). Para el sulfato de amonio se obtuvo en la temporada de invierno solo un 0.99%, mientras en la temporada de verano un 0.83%, mucho más bajo que lo mostrado por Mendoza y Pardo (2005) donde se obtuvo 13%, pero muy similar a lo encontrado por Chow *et al.* (2000) en invierno con 1.5%. Mientras que más bajo que lo mostrado por Chow *et al.* (1997) en verano, los cuales obtuvieron 3.93%. Todo esto para la zona urbana. Por último, el resultado de la medición de las contribuciones de las varias especies de partículas indica una alta concentración de material de origen secundario proveniente en parte del material geológico de la zona y por las actividades antropogénicas propias de la región.

En el caso de la zona rural, donde hasta la fecha no se habían hecho investigaciones sobre material particulado PM₁₀, se reportan los datos encontrados en el análisis químico, donde se da como mayoritario en ambas zonas el material geológico con 53.67% en la temporada de invierno y en la temporada de verano con 52.34%, debido mayormente a la erosión provocada por el viento (Meza *et al.* 2009) teniendo como segunda fuente principal al material orgánico con 37.47% y 35.93%, para la temporada de invierno y temporada de verano, respectivamente, debido a la quema de residuos agrícolas (esquilmos) en la región mientras el carbón elemental se ubicó como el tercer mayor contaminante con 4.49% en la temporada de invierno y 5.31% en la temporada de verano, mayormente ocasionada por automotores o maquinaria propia de la agricultura que usen gasolina o diésel.

CONCLUSIONES

El análisis presentado muestra que la ciudad de Mexicali, no tiene una calidad del aire satisfactoria tanto en la zona urbana como en la zona rural que fueron los objetos de análisis de este trabajo en las dos temporadas bajo estudio (invierno y verano), donde la principal causa de esta contaminación es diferente para cada caso. De la presente investigación se puede concluir, que la temporada de invierno es la más contaminada debido a su alta cantidad de violaciones a la norma mexicana con 27 y que la zona rural de Mexicali es la que tiene los niveles más altos de contaminación.

El material orgánico es la especie mayoritaria en las PM₁₀ de la temporada de invierno en la zona urbana con 54.52%, producto entre la quema y residuos orgánicos, en cambio para la zona rural en la misma temporada la especie mayoritaria fue el material geológico con 53.67%, debido mayormente a la erosión causado por el viento. Mientras que para la temporada de verano el PM₁₀ en ambas zonas de estudio (zona urbana y zona rural) la especie mayoritaria fue derivada del material geológico con 75.48% y 53.34% respectivamente, producido por el polvo de la región; así mismo derivado de los resultados del análisis estadístico queda de manifiesto que no hay transporte de contaminantes entre las zonas estudiadas y que la contaminación encontrada en ellas proviene de fuentes locales y no regionales.

Estos resultados dejan de manifiesto cierta similitud con los trabajos hechos en la zona urbana de Mexicali por Chow *et al.* (1997) y Chow *et al.* (2000), no así con el trabajo hecho por Mendoza y Pardo (2005), donde da resultados totalmente diferentes. Esto nos lleva a pensar que en el transcurso de los años, se ha diversificado la composición química del material particulado PM₁₀ en la región, mas no ha disminuido la contaminación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento de parte de CONACYT e Instituto de Ingeniería, el apoyo prestado por el Técnico Académico Enrique Dávalos, meteorólogo de la UABC y al Ingeniero Manuel Colima de CONAGUA Mexicali. Asimismo, a la enfermera María Luisa Quintero Núñez por dar facilidades para el uso de su rancho en el montaje de los muestreadores y al Instituto de Ingeniería de la UABC por el uso de sus instalaciones.

REFERENCIAS

- Alcalá, J., M. Sosa, M. Moreno, C. Quintana, A. Campos y C. Holguin, *Retención de polvo atmosférico en especies arbóreas indicadoras de la planeación urbana sustentable: ciudad de Chihuahua, México*, Multequina: 17, 17-28 (2008).
- Alfaro, S.C., A. Gaudichet, L. Gomes y M. Maillé, *Mineral aerosol production by wind erosion; Aerosol particle sizes and binding energies*, Geophysical Research Letters: 25(7), 991-994 (1998).
- Bascom, R., P.A. Bromberg, D.A. Costa, R. Devlin, D.W. Dockery, M.W. Frampton, W. Lambert, J.M. Samet, F.E. Speizer y M. Utell, *Health effects of outdoor air pollution*, Am J Resp Crit Care Medical: 153(1), 3-50 (1996).
- Camargo, B.A. y R.O. García, *Evaluación de dos modelos de reducción de escala en la generación de escenarios de cambio climático en el valle de Mexicali en México*, Información tecnológica: 23(3), 11-20 (2012).
- Ceballos, R.J.E. y E.M. Melgar, *Estimación de costos y gastos directos de los efectos en la salud humana asociados a la contaminación del aire*, Actas del 5º simposio de contaminación atmosférica, 179-184, Iztapalapa, México, 19 al 21 de Junio (2005).
- Chow, J.C. y J.G. Watson, *Imperial Valley / Mexicali Cross Border PM₁₀ Transport Study*, Desert Research Institute, San Francisco, Estados Unidos (1997).
- Chow, J.C., J.G. Watson, M.C. Green, D.H. Lowenthal, B. Bates, W. Oslund y G. Torres, *Cross border transport and spatial variability of suspended particles in Mexicali and California's Imperial Valley*, Atmospheric Environment: 34(11), 1833-1843 (2000).
- Chow, J.C. y J.G. Watson, *Overview of ultrafine particles and human health*. In Management of natural resources, sustainable development and ecological hazards. WIT Transactions on Ecology and the Environment, pp 619-632 Southamton, UK (2006).
- Echeverri, C.A. y G.J. Maya, *Relación entre las partículas finas (PM_{2.5}) y respirables (PM₁₀) en la ciudad de Medellín*, Revista de Ingenierías Universidad de Medellín: 7(12), 23-42 (2008).
- García, O.R., E. Jáuregui, D. Toudert, A. Tejeda, *Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use*, Atmósfera: 20(2), 111-131 (2007).
- García, O.R., A. Tejeda y G. Bojórquez, *Urbanization effects upon the air temperature in Mexicali, B. C., México*, Atmósfera: 22(4), 349-365 (2009).
- INEGI (en línea) *México en cifras: información nacional, por entidad federativa y municipios*, http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=2_ Acceso: Enero (2013).
- Katzman, T.L., A.P. Rutter, J.J. Schauer, G.C. Lough, C.J. Kolb y S.V. Klooster, *PM_{2.5} and PM_{10-2.5} Compositions during Wintertime Episodes of Elevated PM Concentrations across the Midwestern USA*, Aerosol and Air Quality Research: 10, 140-153 (2010).
- Kelly, K.E., I.C. Jaramillo, M. Quintero, D.A. Wagner, K. Collins y H.L. Meuzelaar, *Low-Wind/High Particulate Matter Episodes in the Calexico/Mexicali Region*, Journal of the Air & Waste Management Association: 60(12), 1476-1486 (2010).
- Künzli, N., R. Kaier, S. Medina, M. Studnicka, O. Chanel, P. Filliger, M. Herry, V. Puybonnieux, P. Quénel, J. Schneider, R. Seethaler, J.C. Vergnaud y H. Sommer, *Public health impact of outdoor and traffic related air pollution: an European assessment*, The Lancet: 356(9232), 795-801 (2000).
- Mendoza, A. y E.I. Pardo, *Niveles de PM_{2.5} y su composición química en la atmósfera de Mexicali, BC durante el otoño de 200*, Actas del 5º simposio de contaminación atmosférica 55-59, Iztapalapa, México, 19 al 21 de Junio (2005).
- Meza, L.M., M. Quintero, R. García, y J. Ramírez, *Estimación de factores de emisión de PM₁₀ y PM_{2.5}, en vías urbanas en Mexicali, Baja California, México*, Información Tecnológica: 21(4), 45-56 (2010).
- Muñoz, R., V. Pérez, C. Ortuño, M. del C. Palomera, V.H. Páramo, R. Ramos y P. Cicero, *Evaluación de la exposición de la población de la zona metropolitana del Valle de México a ozono y partículas menores a 10 micrómetros*, Actas del 5º simposio de contaminación atmosférica, 109-114, Iztapalapa, México, 19 al 21 de Junio (2005).
- Querol, X., *Calidad del aire, partículas en suspensión y metales*, Revista Española de Salud Pública: 82(5), 447-453 (2008).

- Quintero, M., S.E. Ahumada, M.A. Reyna, L.M. Meza y M.A. Canales, *Calidad del aire y salud en Mexicali, En Programa Ambiental Universitario de la UABC*. Universidad Autónoma de Baja California, pp. 289 - 325, Mexicali, México (2011).
- Rodríguez, J.M., *Los desastres naturales en Mexicali, B. C.: Diagnóstico sobre el riesgo y la vulnerabilidad urbana*, Frontera Norte: 14(27), 123-153 (2002).
- Romero, M., F. Diego y M. Álvarez, *La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología, Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología*, Cuba: 44(2), 1-14 (2006).
- SPA, SEMARNAT, ECOLOGÍA., *Pro-Aire Mexicali 2011 – 2020. Programa para mejorar la calidad del aire en Mexicali 2011–2020*, 92 – 120, Mexicali, México (2011).
- Tzintzun, M.G., L. Rojas y A. Fernández, *Las partículas suspendidas en tres grandes ciudades mexicanas*, Gaceta ecológica: 74, 15-28 (2005).
- Viana, M.M., *Niveles, composición, y origen del material particulado atmosférico en los sectores norte y este de la península Ibérica y Canarias*, Tesis de Doctorado, Departamento de Geoquímica y Petrología, Universidad de Barcelona, Barcelona, España (2003).
- Villalobos, R., O. Amador, A.R. Flores, J. Guzmán, Z. Munive, L. Hernández, M. Murillo, S. Gómez y S.M. Waliszewski, *Materia orgánica extraída de las aeropartículas de la ciudad de México y sus efectos genotóxicos*, Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas: 11(2), 105-109 (2008).
- Watson, J.G. y J.C. Chow, *Visibility and air pollution*. En Management of natural resources, sustainable development and ecological hazards. WIT Transactions on Ecology and the Environment, pp. 839, Southamton, UK (2006).
- Zuk, M., M.G. Tzintzun y M.G. Rojas, *Tercer almanaque de datos y tendencia de la calidad del aire en 9 ciudades Mexicanas*, SEMARNAT e INE, México D.F, México (2007).