

**CONCENTRACIONES DE PARTÍCULAS TOTALES EN
SUSPENSIÓN (PTS) Y SU CARACTERIZACIÓN QUÍMICA,
DURANTE EL PRIMER PERÍODO LLUVIOSO DEL AÑO 2004, EN
LA ATMÓSFERA DE LA CIUDAD DE MÉRIDA, VENEZUELA²**

Concentrations of total suspended particulate (tsp) and chemical characterization during the first rainy period of 2004, in the air of the city of Merida, Venezuela

Carlos La Rosa, Rigoberto Andressen, Angel Contreras y Raiza Fernández

RESUMEN

La contaminación atmosférica está entre los graves problemas ambientales y de salud que confrontan nuestras ciudades, debido al incremento de la población, expansión urbana y aumento desordenado del tráfico automotor. En este trabajo se recogieron muestras de partículas en suspensión (PTS) en el aire, con un equipo Hi-Vol y partículas depositadas (PAD) en la superficie, en la ciudad de Mérida, Venezuela, para el período marzo 1 a junio 30 de 2004. Las muestras fueron analizadas conforme a técnicas físicas y químicas establecidas, además se realizó un análisis de la data meteorológica local. Los principales resultados indican que en la ciudad de Mérida, para el lapso de muestreo, el aire podría considerarse limpio. Que el magnesio, calcio, aluminio, plomo y manganeso asociados a las PTS provienen de fuentes naturales más fuentes antrópicas; mientras que el sodio, zinc, potasio, cobre, níquel y vanadio proceden sólo de fuentes antrópicas, y que el lavado de la atmósfera está muy relacionado con la intensidad de la lluvia, siendo este proceso más importante en los meses de mayo y octubre. En Mérida los factores que más afectan el transporte y deposición de los contaminantes son la brisa de valle, desde el suroeste y los eventos pluviométricos que controlan el lavado de la atmósfera local.

Palabras clave: Contaminación Atmosférica, Partículas Totales en Suspensión (PTS), Partículas Depositadas (PAD), Metales Asociados a PTS, Mérida, Venezuela.

ABSTRACT

Air pollution is among the serious health and environmental problems facing our cities, due to population growth, urban expansion and increased disorderly automobile traffic. This paper deals with the sample collection of total suspended particles (TSP) in the air, with a Hi-Vol instrument and deposited particles (PAD) on the surface, in the city of Merida, Venezuela, during the period March 1st to June 30th, 2004. The samples were analyzed according to the established chemical and physical techniques; in addition a local meteorological analysis was performed. The main results indicate that in Merida, for the sampling period, the air may be considered clean. That magnesium, calcium, aluminum, lead and manganese associated with the PTS come from either natural sources or anthropogenic sources, whereas the sodium, zinc, potassium, copper, nickel and vanadium come only from anthropogenic sources. The washout of the atmosphere is closely related to the rain intensity, being this process more important in May and October, which are months peak-rainfall. In Merida, the factors that affect the pollutants transport and deposition are the valley breeze from the southwest and rainfall events that control local atmospheric washout.

Key words: Air Pollution, Total Suspended Particles (TSP), Particles Deposited (PAD), Metals Associated With Tsp, Merida, Venezuela.

INTRODUCCIÓN

Entre los graves problemas ambientales y de salud, que actualmente confronta la humanidad, está el de la contaminación atmosférica. El aumento de la población, la expansión urbana y la contaminación están directamente relacionados; lo que implica que las ciudades, que han venido experimentando un rápido proceso de desarrollo y expansión, estén presentando graves problemas en la calidad del aire. El grado de contaminación en un ambiente urbano depende de factores como el tamaño de la ciudad, la densidad de la población, el patrón urbanístico, la densidad y actividad del tránsito automotor, las actividades económicas, las condiciones geográficas y los

factores meteorológicos y climatológicos. En el estudio realizado por Mayer (1999), en Alemania, sobre contaminación atmosférica en grandes ciudades, se demuestra que la creciente industrialización y consumo de energía producen un rápido y peligroso incremento en los niveles de contaminación, muy preocupante, porque se traduce en una importante amenaza para la salud humana.

En un estudio pionero, en Venezuela, Campagna (1976) recoge información relevante sobre la calidad del aire en la ciudad de Caracas. El autor establece una relación entre las partículas atmosféricas depositadas (PAD) y los metales asociados, analizando vanadio (V), níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), plomo (Pb) y estroncio (Sr). Los valores obtenidos para el Cu (120 $\mu\text{g/g}$), Ni (70 $\mu\text{g/g}$), V (120 $\mu\text{g/g}$) y Sr (110 $\mu\text{g/g}$) están en los intervalos normales de concentración en comparación con los encontrados en suelos. Sin embargo, el hallazgo resaltante fue que las PAD se encuentran enriquecidas con Pb (3350 $\mu\text{g/g}$) y Zn (1500 $\mu\text{g/g}$), cuyo origen se atribuyó al tetraetil de plomo, utilizado en la gasolina para ese momento, y el zinc se relacionó con el contenido de dicho metal en los aceites lubricantes.

En una interesante investigación de recolección de muestras de partículas depositables (PAD) en los túneles del área metropolitana de la ciudad de Caracas, Fernández (1996), realiza una caracterización química y mineralógica, encontrando concentraciones de Pb (5500–13000 $\mu\text{g g}^{-1}$), Zn (885–1733 $\mu\text{g g}^{-1}$), y Cu (56–263 $\mu\text{g g}^{-1}$). La presencia de estos elementos cuantificados en las muestras, pone de manifiesto que una mayor proporción en ese ambiente es atribuible a las emisiones de fuentes móviles (tráfico automotor). La caracterización mineralógica de las partículas recolectadas arrojó como resultado que las mismas están constituidas, aproximadamente, en un 80% de material de origen natural (minerales) y 20% de origen antrópico.

En un estudio realizado en la ciudad de Trujillo (Newson *et al.*, 1997), se pone en evidencia la presencia de plomo en muestras de polvo colectadas del piso frente a las casas y en los alrededores de las mismas. El plomo se extrajo con una mezcla 1:1 $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ al 30 %, y se procedió a evaluar la concentración del metal utilizando espectroscopia de absorción atómica. Los investigadores encontraron niveles de Pb superiores a 500 $\mu\text{g.g}^{-1}$, principalmente en las muestras colectadas en las calles frente a las casas, e indicaron que dichos

niveles se pueden considerar como peligrosos y los asociaron con el flujo vehicular, al compararlo con los niveles de Pb encontrados en las muestras colectadas en la parte trasera de las casas ($160 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), provenientes de otras fuentes, como pinturas.

Un estudio de importancia por las distintas metodologías analíticas utilizadas es el de Sánchez (2000), realizado en el eje norte costero oriental (Píritu–Guanta). Las muestras se recolectaron con un equipo *Hi-Vol* para la posterior medición de las PTS y su caracterización química. En esta investigación se midieron concentraciones de cloruro (Cl^-), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) y sulfato ($\text{SO}_4^{=}$), utilizando la técnica de Cromatografía Iónica y Plasma Acoplado Inductivamente para cuantificar calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+), y espectrofotometría, para el análisis de amonio (NH_4^+). Se reporta un comportamiento ajustado a la distribución normal para las PTS, los cationes y los aniones en cada una de las muestras recolectadas en las estaciones. Los factores de enriquecimiento encontrados para el Ca^{2+} , $\text{SO}_4^{=}$, K^+ y Na^+ , fueron mayores a 2 y menores de 0,5 para el Mg^{2+} , indicando la existencia de otras fuentes de origen antrópico que determina la composición química.

Con la finalidad de caracterizar geoquímicamente muestras de PTS, Pérez (2003), mide concentraciones de Na^+ y K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , NH_4^+ y Cl^- , NO_3^- , $\text{SO}_4^{=}$ y oxalato ($\text{C}_2\text{O}_4^{=}$), en especímenes recolectados en áreas urbanas y suburbanas de la Región Capital y el Estado Miranda. Los hallazgos en las concentraciones de estas especies químicas, evidencian valores por encima de los mínimos de acuerdo a la norma en períodos de sequía, en comparación con los obtenidos durante el período de lluvia en ambas localidades.

Debido al impacto que en el aire tienen las empresas fabricantes de cemento, García y Colaboradores (2002), realizaron un estudio para la detección de concentraciones atmosféricas de PTS y las fracciones de Pb y V, Ca, Ni, Fe y Mn asociadas a ellas, en una zona adyacente a una planta de fabricación de cemento, y establecieron el posible origen de dichas especies. Se escogieron dos sitios de captación de muestras pertenecientes a la Red-MECA del Instituto para la Conservación del Lago de Maracaibo (ICLAM), uno en el municipio San Francisco (estado Zulia), una zona bajo influencia de fuentes antrópicas (fábrica de cemento y termoeléctrica) y otro en Sinamaica,

en el mismo estado, zona considerada como referencia. En el 91% de las muestras de San Francisco se registran concentraciones de PTS superiores al valor límite de la norma venezolana ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), mientras que en Sinamaica el 100% están por debajo de este valor. Las concentraciones enriquecidas de Pb, V, y Ni, su frecuencia de distribución y las altas correlaciones entre ellas, son indicativos de una importante contribución de fuentes antrópicas de partículas en el municipio San Francisco. El Pb representa el aporte de las emisiones de origen móvil. Las concentraciones no enriquecidas de Mn, Fe y Ca pueden considerarse de origen natural.

Guajardo y colaboradores (2010), analizan la distribución espacial de las PTS en la atmósfera de Caracas y su evolución en el período 1981–2006. Entre las principales conclusiones se indica la existencia de una tendencia a la disminución de la concentración en el período analizado. Las estaciones de muestreo del centro histórico de Caracas y del oeste fueron las únicas que presentaron valores por encima de la norma nacional.

Las referencias antes citadas ponen de manifiesto que las partículas incorporadas a la atmósfera como contaminantes pueden tener dos orígenes, el natural (erosión, erupciones volcánicas, quema natural de biomasa, entre otros) y el antrópico (producto de actividades humanas). El estudio de los niveles de concentración de las partículas atmosféricas y de metales asociados a las mismas, refleja el interés que ha despertado este tópico por los efectos que tienen sobre el cambio climático, calidad de aire y salud de las personas.

El desarrollo de nuevas técnicas de muestreo ha inducido a que las normas establecidas para calidad de aire sean cada vez más rigurosas. Actualmente, en los Estados Unidos de América la normativa en calidad de aire se basa en el monitoreo de partículas cuyo diámetro aerodinámico es inferior a 2,5 micras ($\text{PM}_{2,5}$); mientras que en Venezuela continua vigente la norma que establece el monitoreo de PTS en lo referente a calidad de aire. De igual manera con el avance de las nuevas técnicas analíticas se han mejorado los límites de detección de metales en partículas atmosféricas, siendo las más usadas las ICP-AES, para el análisis de metales, y la Cromatografía Iónica para aniones.

En Mérida se han realizado estudios relacionados con la contaminación por metales (Pb principalmente), de distintas matrices ambientales, tal como se mencionó antes; sin embargo, es muy escasa la bibliografía relacionada con

la determinación de metales asociados a partículas atmosféricas. El estudio de las PAD en nuestro país ha sido del interés de los investigadores, desde mucho antes de implantarse los criterios de calidad de aire y control de la contaminación atmosférica. Por otra parte, también ha sido del interés de los investigadores conocer la concentración de las PTS en la atmósfera, dado que ambos tipos de partículas se encuentran en las zonas de estudio. Por otra parte, las PAD presentan elevados niveles de los contaminantes atmosféricos asociados a las mismas (por lo menos un orden de magnitud superiores a las PTS). Estos resultados podrían mostrar que un análisis simultáneo PAD-PTS puede servir para evaluar el posible origen de las mismas, así como también determinar la calidad del aire que se respira en la ciudad de Mérida y sus posibles efectos sobre la salud pública.

El crecimiento poblacional está exigiendo más áreas cultivables con el fin de que se pueda alimentar a un número, cada vez mayor, de habitantes. El incremento en la producción y consumo de productos agroquímicos en los cultivos y un manejo inadecuado y poco racional de los recursos suelo, agua y aire, ha implicado que las ciudades venezolanas, que han venido experimentando un rápido proceso de expansión, desarrollo y demanda de alimentos, estén presentando serios problemas de la calidad del aire, y, por lo tanto, de la calidad de vida.

La presencia de una región semiárida en el valle medio del Chama, al suroeste de la ciudad de Mérida, es probable que sirva de fuente de material particulado que es transportado por la brisa de valle hacia el noreste, contribuyendo, posiblemente, al desmejoramiento de la calidad del aire en la ciudad. Estas partículas tienden a depositarse durante la noche, cuando la brisa de montaña enfría la ciudad, el viento se hace más débil y disminuye significativamente la altura de la capa de mezcla. (Arya, 1999).

El presente trabajo tiene por objeto la recolección de las PTS y PAD, en cinco sitios de la ciudad de Mérida, para la determinación de sus concentraciones y posterior análisis químico, determinación de los metales asociados a las PTS y PAD, evaluación del factor de enriquecimiento con el fin de discriminar la posible procedencia antrópica o natural de los contaminantes y del factor de lavado en la atmósfera. Para entender las relaciones entre los niveles de concentración y procedencia de las PTS se efectuó un análisis de la

data meteorológica de los vientos dominantes y de los eventos pluviométricos, característicos del período de muestreo.

METODOLOGÍA

Captación de Muestras de Partículas Totales Suspendidas (PTS). En la recolección de las PTS se utilizó un muestreador de alto volumen (Hi-Vol) marca Graseby (*GMW High Volume Air Sampler*), modelo 2000-H, con una velocidad de flujo de aire de $1132 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ($40 \text{ pies}^3 \cdot \text{min}^{-1}$), que impacta contra un filtro hecho de un material apropiado y con un tamaño de poro que permite capturar partículas de $30 \mu\text{m}$ o menos, con una capacidad de captación exacta que puede recoger muestras cuya masa oscile entre 6 y 1600 mg de aire muestreado. El método de muestreo de aire con Hi-Vol es el recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, 1999) y es aplicable para cualquier medida de PTS en la atmósfera. (EcoCaracas, 1995).

Se utilizaron filtros de fibra de vidrio y filtros de celulosa, ambos compatibles con el equipo captador automático (Hi-Vol) usado en este estudio, con la finalidad de comparar la eficiencia de éstos en lo referente a retención de humedad (higroscopicidad), estabilidad química, estabilidad mecánica y eficiencia de muestreo de partículas. Los filtros fueron pesados previamente (Balanza Mettler Toledo AB204). La determinación de la concentración de las PTS se realizó, utilizando el método recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA, 1999) y por la Comisión Venezolana de Normas Técnicas (COVENIN,1995), mediante la siguiente fórmula:

$$C = \{(M_f - M_i) / V\} \times 10^6$$

M_f = Masa del filtro seleccionado con la cantidad de PTS colectadas

M_i = Masa del filtro antes de ser colocado en el Hi-Vol

V = Volumen de aire muestreado

10^6 = Factor para convertir g a μg .

Los lapsos de captación fueron variables, entre 1 y 6 días.

Con el fin de calibrar y poner a punto el equipo Hi-Vol, se hicieron ensayos preliminares de pre-muestreo, lo que además contribuyó con la selección de los sitios y de los metales a ser analizados.

La recolección de las partículas depositadas (PAD), además de darnos una medida del proceso de deposición seca, nos permite calcular el Coeficiente de Enriquecimiento, uno de los objetivos de este trabajo. Las partículas fueron colectadas a nivel del suelo con una aspiradora de mano (marca 'Orion Prime'), con velocidad de flujo constante, en un área de 10 m² alrededor del sitio de instalación del Hi-Vol, por un lapso de 30 días. Luego, se realizó la separación del material grueso con un tamiz de 2 mm. El material menor a 2 mm de diámetro fue colocado en bolsas de polietileno herméticamente selladas. Luego en el laboratorio estas muestras fueron separadas con un tamiz de 50 µm en dos sub-muestras, las PAD ≥ 50 µm y las PAD < 50 µm, para ser tratadas con la misma mezcla ácida seleccionada para los filtros usados en las PTS. Se tomaron para cada sub-muestra 2 fracciones de 1 g cada una, para asegurar resultados representativos de la concentración de los metales asociados. (Contreras, 2006).

Reactivos y patrones utilizados. Agua destilada y desionizada grado 18.3 MW cm. Ácido Nítrico (70,0 % J.T. Baker). Ácido clorhídrico (37 % Merck). Solución patrón de 1000 µg/mL de V. Patrón multielemental ICP: *Solutions Plus Inc.* (5% HNO₃) de Al, As, Ba, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Mb, Ni, Se, Sr, Zn (50 ppm c/u) y K (500 ppm). Patrón ICP: *Solutions Plus Inc.* (5% HNO₃) de Fe (9965 ppm). Patrón ICP: *Solutions Plus Inc.* (5% HNO₃) de Mg (9959 ppm). Patrón ICP: *Solutions Plus Inc.* (5% HNO₃) de Ca (9998 ppm). Patrón ICP: *Solutions Plus Inc.* (H₂O 18 W) de Na (10018 ppm). Estándar de referencia de Material Particulado Urbano 1648. (NIST, 2001).

Análisis de la data meteorológica. Se efectuó con base a los datos de la estación meteorológica sinóptica del aeropuerto de Mérida (Serial 3047), operada por el Servicio de Meteorología de la Aviación Militar, ubicada a 08° 36' norte, 71° 11' oeste y 1479 m.s.n.m. Se consideraron los siguientes elementos meteorológicos: precipitación horaria-diaria, dirección y velocidad del viento a 10 m., datos horarios-diarios y nubosidad cada 6 horas, para el período 1 de marzo a 31 de julio de 2004, a objeto de que el lapso de muestreo estuviese comprendido en el primer período lluvioso de Mérida.

Determinación del Factor de Enriquecimiento (FE). Los metales pesados (MP) presentes en el ambiente provienen de fuentes naturales o también son liberados por las diferentes actividades humanas y, usualmente, se adhieren a las partículas finas. Para determinar las posibles fuentes de los metales analizados se calculó el Factor de Enriquecimiento con el objeto de discriminar las posibles fuentes de los metales asociados a las PTS, sean éstas naturales o antrópicas.

El **FE** es calculado como:

$$FE = (Xi / Fe)_{\text{aire}} / (Xi / Fe)_{\text{suelo}}$$

Donde:

Xi = Concentración de elemento bajo estudio (en aire, en suelo)

Fe = Concentración de hierro – elemento de referencia (en aire y en suelo)

El método del **FE** normaliza la concentración de la especie medida (MP) con respecto a una muestra de referencia, usualmente Fe o Al (Ravichandran *et al.*, 1995).

En este trabajo se tomó como referencia el Fe, como ‘proxy’ para el contenido de metales pesados en las PTS. El Fe es un elemento que tiene una concentración relativamente alta en la corteza terrestre; por lo que no se espera que sustancialmente se enriquezca a partir de fuentes antrópicas.

Proceso de lavado de la atmósfera. El proceso de lavado de la atmósfera (*rain scavenging* en inglés) es considerado como un mecanismo muy importante de limpieza del aire. Es un proceso complejo, en el que intervienen las características físico-químicas de las partículas en suspensión y las condiciones atmosféricas presentes, específicamente las relacionadas con la lluvia, como duración, intensidad y tamaño de las gotas. El Coeficiente de Lavado puede ser modelado en función de la especie contaminante y la intensidad de la lluvia. Esto implica considerar un espectro fijo del tamaño de las gotas y estandarizar lo referente al tipo de precipitación, es decir, no se distingue entre precipitación frontal, convectiva u orográfica. Desde este punto de vista, el Coeficiente de Lavado (Λ) puede describirse por la siguiente ecuación:

$$\Lambda = a J^b$$

Donde:

a y b son parámetros que dependen del tipo de contaminante.

Por defecto, $a = 1.0 \times 10^{-4}$ y $b = 0,64$

J = Intensidad de la lluvia ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) (National Power & CERC, 2012)

En el presente trabajo se hicieron estimaciones del coeficiente de lavado sobre la base de su relación con la intensidad de la lluvia, basados en la relación anterior; ya que no se disponía de mediciones de la concentración del contaminante en la precipitación.

Ubicación del Área de Estudio y Sitios de Muestreo. La zona de estudio seleccionada forma parte de la ciudad de Mérida. Se escogieron sitios de muestreo ubicados en distintas localizaciones urbanas (Fig. 3), considerando los siguientes factores: seguridad y facilidad de acceso, población en los alrededores de los sitios de muestreo, actividades económicas, disposición espacial que tendría el equipo una vez instalado (altura mínima de 2 metros) y representatividad geográfica; teniendo en cuenta las limitantes que el equipo genera, como es el fuerte ruido y vibración que perturba la tranquilidad del entorno. Lo deseable hubiese sido disponer de dos equipos Hi-Vol, para la realización de medidas simultáneas. Sin embargo, las serias limitaciones en lo referente a la disponibilidad de recursos imposibilitaron ese objetivo.

Los lapsos y frecuencia del muestreo se diseñaron de acuerdo con lo estipulado en las normas venezolanas (COVENIN, 1995), que establece una cantidad mínima de veinte muestras efectivas colectadas en ambos períodos climáticos del año; lo que equivale a un mínimo de diez muestras en cada uno de ellos. En este estudio se colectaron catorce muestras, en la primera época lluviosa; dadas las características pluviométricas de la región (Sarmiento, 1986; Andressen, 2007). Asimismo, las muestras cumplen con un período mínimo de cuatro semanas, con frecuencia de captación de tres días, para estudios que se realicen en un lapso menor de seis meses.

Las coordenadas geográficas de los sitios seleccionados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo (Coordenadas determinadas con GPS Garmin 12)

SITIO DE MUESTREO	LATTITUD N.	LONGITUD W.	ALTITUD m.snm
LA HECHICERA	8o 37' 37,9"	71o 09' 01,1"	1930
BARINITAS	8o 35' 29,5"	71o 08' 30,8"	1612
LICEO LIBERTADOR	8o 35' 00,0"	71o 08' 49,1"	1622
LAS AMÉRICAS	8o 35' 52,2"	71o 09' 06,0"	1554
COLEGIO BOSSET	8o 34' 50,1"	71o 10' 46,0"	1436

Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo en la ciudad de Mérida (Mapa base: maps.google.co.ve)



LA CIUDAD DE MÉRIDA Y SUS CARACTERÍSTICAS

La parte media de la cuenca del río Chama es la más poblada del estado Mérida. Sobre una de sus terrazas de mayor extensión se asienta la ciudad de Mérida, que junto con Tabay, Ejido, San Juan y Lagunillas conforman el Área Metropolitana de Mérida con una población de 345.489 habitantes (INE, 2011).

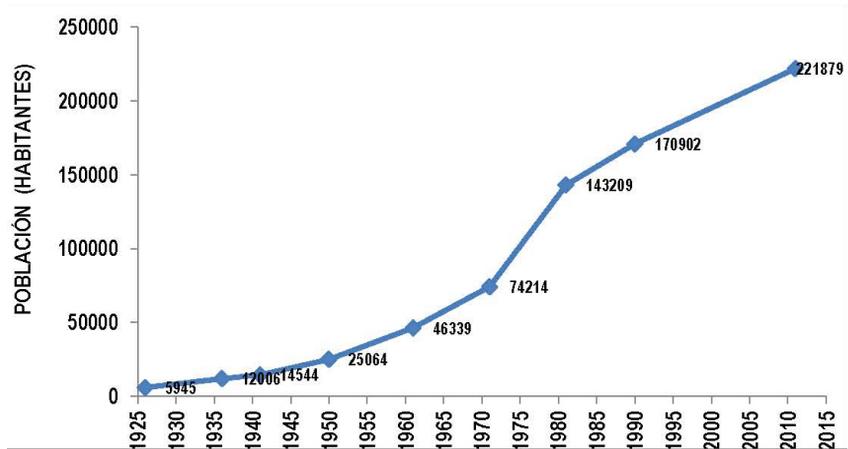
La ciudad está ubicada entre dos importantes cadenas montañosas: la sierra Nevada al sureste con altitudes que sobrepasan los 4800 m.s.n.m. y la sierra de la Culata al noroeste con altitudes que llegan a superar los 4000 m.snm. La ciudad se extiende a lo largo de unos 15 km, desde La Hechicera a una altitud de 1920 m.s.n.m, hasta Ejido, a una altitud de 1100 m.s.n.m. La altitud media de Mérida es de 1510 m.s.n.m y la de la Plaza Bolívar es de 1620 m.s.n.m.

Como resultado del creciente proceso de urbanización, la población urbana aumentó del 12,5 % en 1936 al 88,18% en 2001 en todo el estado, pero el mayor crecimiento ocurrió entre 1950 y 2000; período en el que la relación entre el porcentaje de población urbana con respecto al de la rural aumentó de 0,30 a más de 5,0.

La evolución demográfica de Mérida (Fig. 2) muestra que la ciudad experimentó un lento crecimiento antes de 1970. Es a partir de 1971 cuando la ciudad se expande fuera del núcleo tradicional, hacia urbanizaciones y asentamientos espontáneos que incluyen territorios, previamente ocupados por vegetación boscosa o que se destinaban a la producción agropecuaria. Mientras la población casi se triplicó entre 1950 y 1971, el espacio geourbano se expandió aproximadamente diez veces. De la misma manera se incrementó, masivamente, el parque automotor; lo que generó serios congestionamientos en horas laborales, que se han venido agravando en horas-pico. (Jugo, 2012)

Para 2011, la ciudad de Mérida alcanzó 221.879 habitantes (INE, 2011). En la actualidad la base económica de Mérida, son los servicios, acentuándose los educativos. En el sector secundario de la economía, Mérida no tiene grandes industrias ni fábricas de cemento en su sector urbano ni periurbano; aunque si se encuentra una pequeña zona industrial y diferentes talleres de herrería, carpintería y otras actividades distribuidas en diversas partes de la urbe y en el ámbito periurbano.

Figura 2. Evolución del crecimiento demográfico de la ciudad de Mérida. Período 1926 – 2011

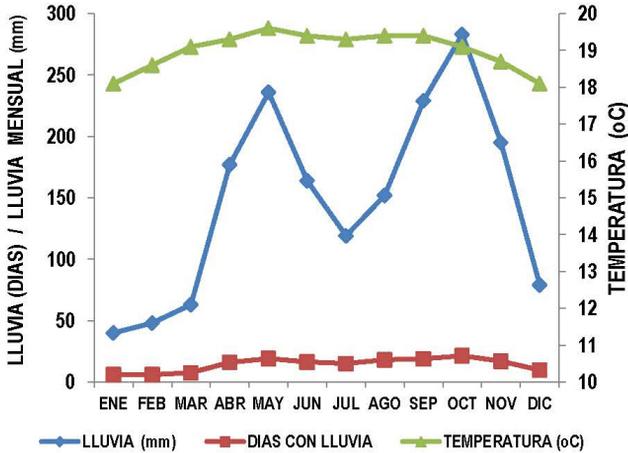


Fuente de datos: INE, 2011.

Características Climáticas. El clima de la ciudad de Mérida es de tipo mesotérmico húmedo, caracterizado por presentar una precipitación media anual de 1754 mm y una temperatura media anual de 18,8° C. El período seco se extiende desde finales de diciembre hasta principios de marzo y el lluvioso desde marzo hasta diciembre, presentando un primer pico lluvioso en mayo y otro más lluvioso en octubre. La temperatura varía muy poco a través del año, con una oscilación térmica anual de 1,5° C. (Fig. 3).

El viento presenta una dirección prevaleciente del oeste-suroeste, con velocidad promedio relativamente baja (entre 2 y 3 m/s). Sin embargo, se presenta un régimen diurno en la circulación del aire caracterizado por la brisa de valle (del suroeste) y de montaña (del este-noreste), siendo más importante y de mayor velocidad el flujo de valle. La brisa de montaña se presenta en la madrugada, mientras que la brisa de valle adquiere mayor importancia en horas de la tarde. (Andressen, 2007).

Figura 3. Climadiagrama de Mérida. Variación estacional de la precipitación, días con lluvia y temperatura. Período 1961-1990



Fuente: Andressen, 2007

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de concentración obtenidos para las PTS en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (microgramo de muestra por metro cúbico de aire), en los puntos seleccionados de la ciudad de Mérida, se presentan en la Tabla 2 y Figura 4. Se aprecia que las concentraciones, por lo general, disminuyen desde el Liceo Libertador (ubicado en el casco urbano, centro de la ciudad expuesto a una alta densidad de tráfico automotor), donde los valores máximos alcanzan cerca de $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, con un valor medio de $55,57 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, hasta Barinitas, ubicada en el mismo casco urbano, pero en el extremo este al borde de la terraza de Mérida, donde el valor medio es de $22,86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ y el máximo es de $43,79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

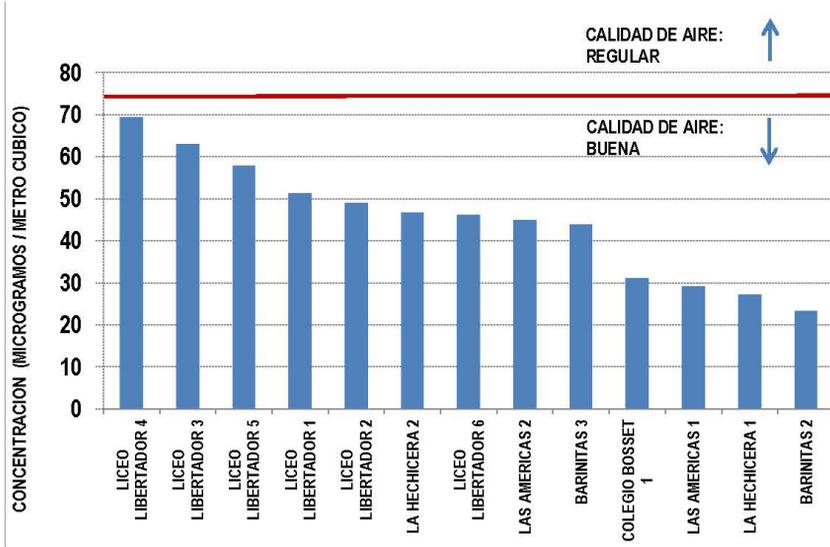
Todos estos valores están por debajo de la norma nacional, de $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de PTS en el aire para una muestra de 24 horas continuas de captación; (Ecocaracas, 1995), lo que indicaría un nivel de aire limpio, si este valor se mantiene en promedio anual, aunque en el caso del sitio del Liceo Libertador está muy cerca del límite de la norma.

Tabla 2. Niveles de Concentración de PTS en la ciudad de Mérida (*)

No.	SITIO DE MUESTREO	MASA PTS (g)	CONCENTRACIÓN $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Fecha de Muestreo
01	Liceo Libertador 4	0,119	69,48 \pm 0,04	Mayo 2004
02	Liceo Libertador 3	0,108	63,06 \pm 0,03	Mayo 2004
03	Liceo Libertador 5	0,395	57,81 \pm 0,03	Mayo 2004
04	Liceo Libertador 1	0,088	51,38 \pm 0,04	Abril 2004
05	Liceo Libertador 2	0,168	49,05 \pm 0,03	Abril 2004
06	La Hechicera 2	0,080	46,71 \pm 0,04	Marzo 2004
07	Liceo Libertador 6	0,237	46,12 \pm 0,02	Mayo 2004
08	Las Américas 2	0,077	44,96 \pm 0,03	Junio 2004
09	Barinitas 3	0,300	43,79 \pm 0,03	Abril 2004
10	Colegio Bosset 1	0,160	31,14 \pm 0,02	Junio 2004
11	Las Américas 1	0,102	29,19 \pm 0,03	Abril 2004
12	La Hechicera 1	0,140	27,25 \pm 0,03	Marzo 2004
13	Barinitas 2	0,120	23,36 \pm 0,02	Marzo 2004
14	Barinitas 1	0,021	11,68 \pm 0,02	Marzo 2004

- Los valores de PTS fueron normalizados a períodos de 24 horas de muestreo.
- El error aleatorio indicado corresponde al de la balanza y al del equipo utilizado.
- El número al lado del nombre del sitio de muestreo indica el orden en que fueron tomadas las muestras con el HI – VOL en cada lugar. Cada muestra se recolectó en un promedio de 2 a 3 días.
- (*) Datos tomados de Contreras (2006)

Figura 4. Niveles de concentración de las PTS ($\mu\text{g m}^{-3}$) para los sitios de muestreo en la ciudad de Mérida (Lapso marzo – junio, 2004)



Metales asociados a las PTS. La Tabla 3 y Figura 5 presentan los resultados de los análisis realizados con respecto a los metales asociados a las PTS, en los distintos sitios de muestreo en la ciudad de Mérida. En vista de la gran variabilidad para cada sitio de muestreo, se calculó la media geométrica de los valores. Se puede apreciar que la secuencia de mayor a menor concentración es: Na, Mg, K, Zn, Ca, Al, Fe, Cu, Pb, Ni, V y Mn.

Tabla 3. Concentraciones de metales asociados a las PTS ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) para los sitios de muestreo en la ciudad de Mérida (Lapso marzo – junio, 2004) (*)

SITIO \ METAL	Al	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	V	Zn
LIBERTADOR 1	1037 8	1285 7	2077	2696	2639 9	1796 5	57	6124 7	< L.C.	< 434	< L.C.	2437 5
LIBERTADOR 2	1408 4	1379 4	189	1416	3329	1720 0	38	7645 0	< L.C.	< 248	< L.C.	3329 8
LIBERTADOR 3	7943	1219 9	2335	1977	1980 7	1573 3	74	4191 5	159	1074	159	2168 7
LIBERTADOR 4	9778	1380 1	2903	2847	2539 8	2217 1	88	5502 8	< L.C.	< 889	< L.C.	2857 9
LIBERTADOR 5	3355	1446 1	2506	2484	9972	2005 4	63	1883 3	61	883	61	4414
LIBERTADOR 6	3122	7102	816	3472	1031 0	1345 8	84	1754 2	90	1390	90	7836
LAS AMÉRICAS 1	7460	1055 0	2050	3800	1693 5	1778 0	95	3795 5	< L.C.	1400	< L.C.	2068 5
LAS AMÉRICAS 2	4857	8532	2688	3013	1010 4	1392 2	117	2302 6	227	987	227	1300 0
LA HECHICERA 1	5564	8800	1489	3257	1288 6	1372 1	89	2963 2	128	893	128	1656 4
LA HECHICERA 2	9069	1028 7	2494	2875	1721 2	1376 9	50	3761 2	181	606	181	2408 1
BARINITAS 1	6207	8082	1087	2562	1166 7	1224 7	57	2549 2	55	547	55	1535 7
BARINITAS 3	1050	3013	732	1855	2813	1579 8	52	3658	28	855	28	598
BARINITAS 4	1715	2295	607	1242	3254 7	1459 7	32	6260	84	284	84	3893
COLEGIO BOSSET 1	6275	8674	1536	2423	1469 6	1410 9	65	3212 7	83	645	83	2681 4
MEDIA (G)	5338	8600	1371	2452	1265 7	1567 8	65	2601 9	93	709	93	1228 8

(*) Datos básicos tomados de Contreras (2006)

Posibles fuentes de los metales asociados a las PTS. Los metales pesados presentes en el ambiente provienen de fuentes naturales o son liberados por diferentes actividades humanas y, usualmente, se adhieren a las partículas finas.

La Tabla 4 y Figura 6 muestran los resultados obtenidos con respecto al Factor de Enriquecimiento, tomándose como muestra referencia el Fe, debido a que presenta una relativa alta concentración natural, y, por lo tanto, no es substancialmente enriquecido a partir de fuentes antrópicas.

Figura 5. Log. de la concentración ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) máxima, media y mínima de metales asociados a las PTS en la ciudad de Mérida (Lapso marzo-junio, 2004)

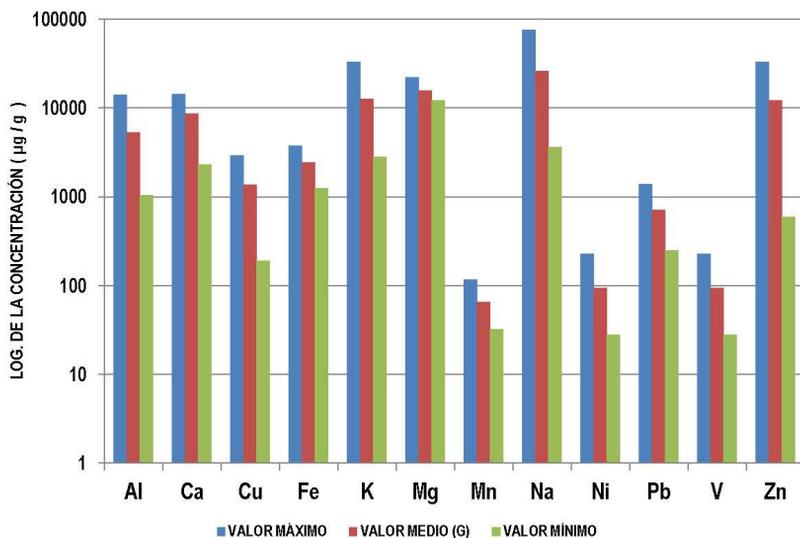
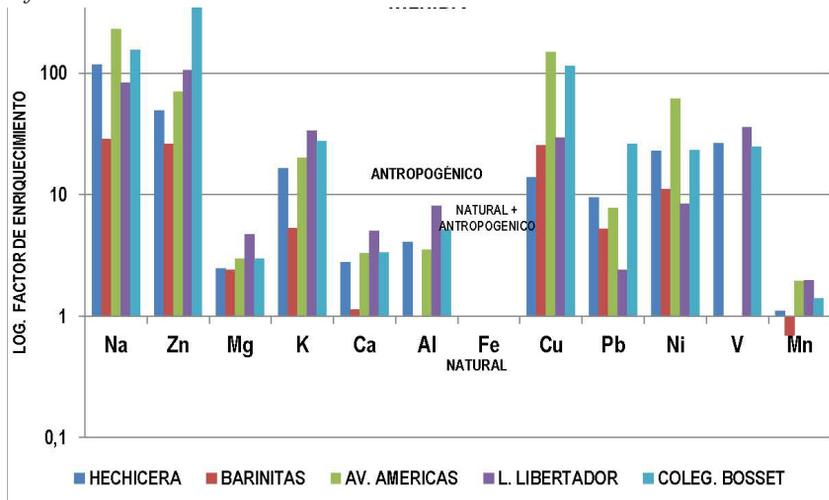


Tabla 4. Factores de enriquecimiento para los diferentes metales y sitios de muestreo, con respecto a la referencia Fe

SITIO MUESTREO	Na	Zn	Mg	K	Ca	Al	Fe	Cu	Pb	Ni	V	Mn
HECHICERA	117,8 7	48,99	2,48	16,48	2,78	4,05	1,00	13,81	9,53	23,02	26,48	1,11
BARINITAS	28,85	26,32	2,39	5,31	1,13	0,99	1,00	25,39	5,22	11,13		0,70
AV. AMERICAS	229,9 5	70,43	2,97	20,02	3,31	3,54	1,00	149,8 5	7,73	61,29		1,94
L. LIBERTADOR	83,69	106,1 9	4,71	33,50	5,01	8,06	1,00	29,47	2,40	8,43	35,86	1,98
COLEG. BOSSET	154,4 1	351,4 4	2,96	27,74	3,36	5,14	1,00	114,0 5	26,05	23,28	24,74	1,40
MEDIA GEOM.	100,2 1	80,54	3,01	17,47	2,81	3,58	1,00	44,61	7,52	19,85	28,64	1,33

Figura 6. Factores de Enriquecimiento para los sitios de muestreo y diferentes metales asociados a las PTS en la ciudad de Mérida



De los resultados obtenidos, los metales asociados a las PTS se pueden discriminar en dos grupos:

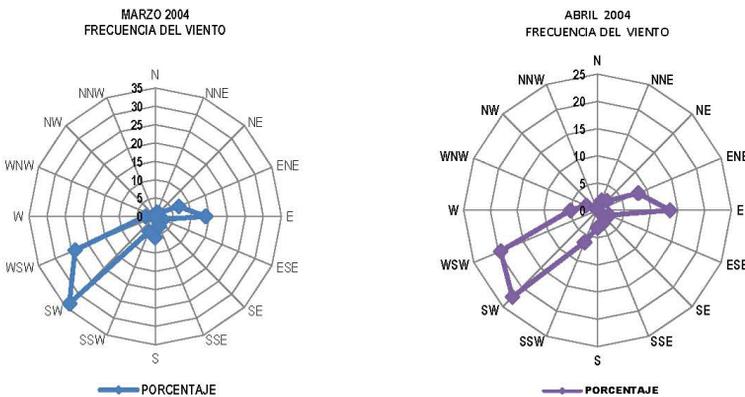
I.- Los provenientes de fuentes naturales más fuentes antrópicas ($1 < FE < 10$): Mg, Ca, Al, Pb y Mn

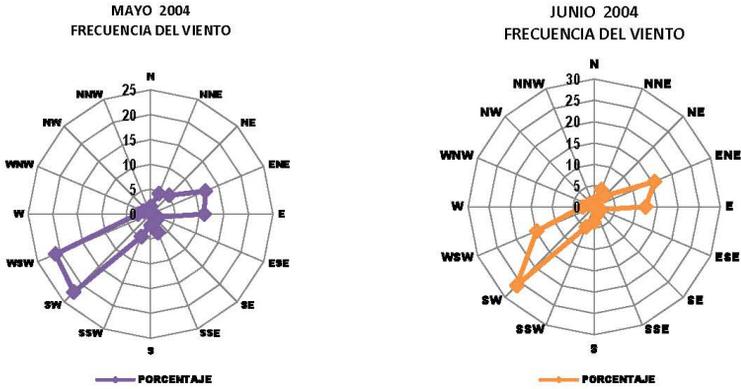
II. Los provenientes sólo de fuentes antrópicas ($FE > 10$): Na, Zn, K, Cu, Ni y V.

Esto implica que las actividades humanas que se desarrollan en Mérida y áreas circunvecinas, son las responsables de la mayor cantidad de metales pesados asociados a las PTS. Estas actividades se vinculan, principalmente con la densidad del tráfico automotor en las calles y avenidas de la ciudad y su entorno, y, en mucho menor grado, con actividades industriales a pequeña escala, este es el caso de las herrerías, talleres metalmecánicos, carpinterías y las relacionadas con materiales de construcción.

Relaciones entre los factores meteorológicos, el transporte de las PTS y el proceso de lavado de la atmósfera. Del análisis de la data meteorológica referido al régimen de vientos (Figura 7), se desprende que durante el período de muestreo el viento dominante fue del suroeste (entre 20 y 35% de las veces) y del oeste-suroeste (entre el 15 y 25% de las veces), que viene a ser la brisa de valle dominante en la cuenca del Chama, durante la mayor parte del año, y que adquiere su máxima intensidad en horas de la tarde. (Andressen, 2007). En sentido opuesto, encontramos como flujo dominante secundario, en marzo y abril, el viento del este con una frecuencia cercana al 15%, y en los meses de mayo y junio el viento del este-noreste con una frecuencia entre 10 y 15%. Esta dirección es el resultado de la brisa de montaña que sopla en la madrugada, pero de menor importancia que la del valle. Es de esperarse, por lo tanto, que la brisa de valle pueda transportar material particulado, preferentemente fino, así como otros contaminantes, desde el sector semiárido de Lagunillas, ubicado al suroeste de la ciudad de Mérida en la cuenca media del río Chama, caracterizado por una cobertura vegetal xerofítica, poco densa.

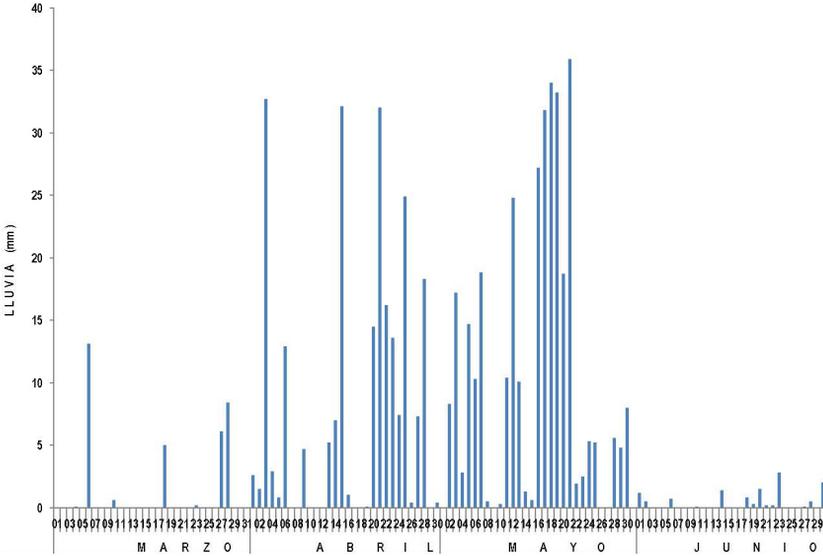
Figura 7. Frecuencia e intensidad del viento dominante en los meses de marzo, abril, mayo y junio de 2004. (Datos de la estación 3047 Mérida-Aeropuerto)





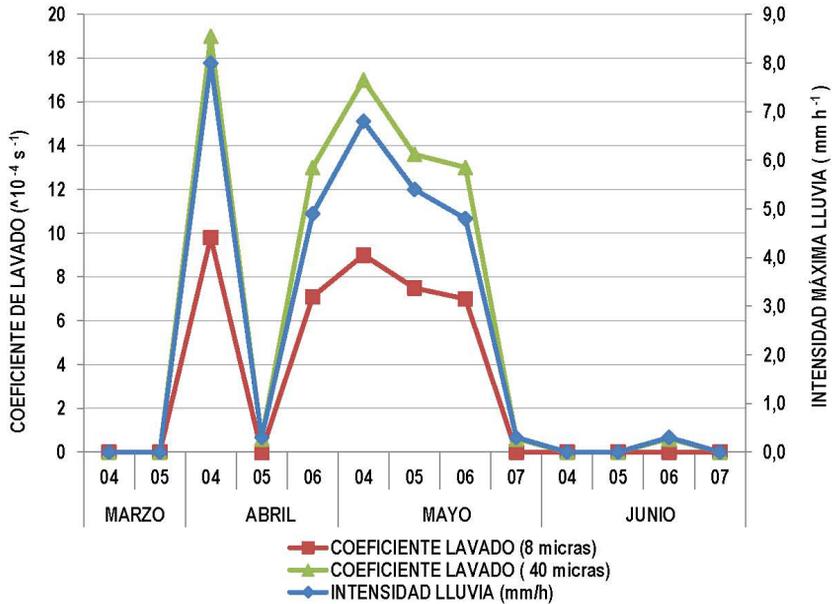
Con respecto a la precipitación, durante el período de muestreo ocurrieron eventos variables, de menor cantidad en los meses de marzo y junio, y más frecuentes y con mayor cantidad de lluvia en abril y mayo (Figura 8). Es de suponer que estos eventos pluviométricos ejercen una función de limpieza del aire, a través del mecanismo de lavado de la atmósfera.

Figura 8. *Eventos pluviométricos ocurridos durante el período de muestreo: 1 de marzo – 30 de junio, 2004. (Basado en datos de la estación 3047 Mérida-Aeropuerto)*



A pesar de que el lavado de la atmósfera es un proceso complejo, difícil de modelar con precisión, el Coeficiente de Lavado propuesto por National Power & CERC (2012), permite apreciar la relación de dicho proceso con la intensidad de la lluvia. La Figura 9 muestra esta relación para el caso de partículas finas (8 micras) y partículas de mayor tamaño (40 micras). En ambos casos, al incrementarse la intensidad de la lluvia se incrementa el proceso de lavado de la atmósfera, pero con mayor magnitud a medida que aumenta el tamaño de las partículas. En el caso de las partículas de 40 micras, el coeficiente de lavado casi duplica al correspondiente a partículas de 8 micras. Las PTS en suspensión en la atmósfera son principalmente removidas por la lluvia en los meses con más eventos y mayor cantidad de precipitación: mayo y octubre (véase Fig. 3).

Figura 9. Relación entre la intensidad máxima de la lluvia (mm.h-1) y el coeficiente de lavado para partículas de 8 y 40 micras de diámetro. Período de muestreo: 1 de marzo – 30 de junio, 2004



CONCLUSIONES

Con respecto a los niveles de concentración de las PTS, los valores encontrados están por debajo de la norma nacional, de $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en el aire para una muestra de 24 horas continuas de captación; lo que indicaría un nivel de aire limpio, si este valor se mantiene en promedio anual, aunque en el caso del sitio del Liceo Libertador está muy cerca del límite de la norma.

Los resultados obtenidos en este estudio ponen de manifiesto que en el aire de la ciudad de Mérida, hay presencia de metales alcalino-térreos como magnesio y calcio por una parte, y aluminio, plomo y manganeso, por la otra, asociados a las PTS provenientes de fuentes naturales más fuentes antrópicas. La presencia del metal plomo tiene su origen en la oxidación del combustible

fósil, mientras que los metales sodio y potasio, zinc y cobre, níquel y vanadio proceden de fuentes naturales (Clorita) y antrópicas (principalmente motores de combustión interna).

La brisa de valle, dominante a partir de las once del mediodía hasta las cinco de la tarde, arrastra PTS procedentes del sector ubicado al suroeste de la ciudad de Mérida, caracterizado por presentar una cobertura vegetal semiárida, que ofrece muy poca protección al suelo. Este sector ocupa una importante área geográfica entre Ejido a 1.200 m.s.n.m. y Estánquez a 442 m.s.n.m., extendiéndose, también, hacia la cuenca del río Nuestra Señora. Todo este sector semiárido presenta una precipitación media anual menor a 600 mm. (Andressen, 2007). De agravarse la situación climática en este sector, por incremento de las condiciones de sequía, o una mayor ocurrencia de lluvias torrenciales y un avance del proceso de desertificación, se generarían escenarios propicios para un deterioro futuro de la calidad del aire en la ciudad de Mérida.

El lavado de la atmósfera está muy relacionado con la intensidad de la lluvia y el tamaño de las partículas. Los resultados ponen de manifiesto que en las PTS menores a 8 micras el proceso de lavado no es relevante. Este proceso de remoción de las PTS cobra mayor importancia en los meses con más eventos y mayor cantidad de precipitación: mayo y octubre.

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio de Meteorología de la Aviación, en la persona del MTM Zurita por su desinteresado apoyo al permitirnos consultar la data meteorológica de la estación de Mérida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andressen, R. (2007). Circulación atmosférica y tipos de climas. En *GeoVenezuela. Tomo 2: Medio físico y recursos ambientales*. P. 238 – 329. Caracas: Fundación Empresas Polar.
- Arya, S. P. (1999). *Air pollution meteorology and dispersion*. New York: Oxford Univ. Press. 310 p.

- Campagna, J. (1976). *Concentración de V, Ni, Cu, Sr, Zn y Pb en el polvo depositado sobre la ciudad de Caracas*. Caracas: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias. Trabajo Especial de Grado.
- Contreras, A. O. (2006). *Determinación de metales asociados a partículas totales suspendidas y depositables en algunos lugares de la ciudad de Mérida*. Mérida: Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Departamento de Química. Trabajo especial de grado.
- COVENIN (1995). *Control de la contaminación atmosférica*. Gaceta Oficial de la república de Venezuela No. 4899. Decreto No. 638. Caracas, Venezuela. 12 p.
- Ecocaracas (1995). Decreto 638 del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Disponible en: <http://www.ecocaracas.com/resources/infoutil/docs/Decreto-638CalidadDeAire.pdf> Consultado el 30.10.2012.
- Fernández, R. (1996). *Estudio químico y mineralógico de las partículas depositadas en los túneles del área metropolitana de Caracas*. Caracas: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química. Trabajo de ascenso.
- García, N., Machado, A., García, C., Socorro, E., Hernández, H. y N. Granda. (2002). Concentraciones atmosféricas de PTS y su contenido de metales en una zona adyacente a una planta de cemento. *Interciencia*, 27, 9: 476 – 481.
- Guajardo, N., Ramírez, A., Díaz, F., Castillo, E., Otero A. y J. Parra (2010). Concentración de las partículas totales suspendidas en la atmósfera de Caracas. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V. Vol. 25*, No. 2, p. 81 – 91.
- Instituto Nacional de Estadística. INE. (2011). *Censo 2011*. Disponible en: www.ine.gov.ve/CENSO2011/index.htm. Consultado el 30.10.2012.
- Jugo B., L. (2012). Comunicación personal
- Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric Environment*, 33: 4029 – 4037.
- National Institute of Standards & Technology. NIST (2001). *Measurements and standards for contaminants in environmental samples*. Disponible en: www.nist.gov/. Consultado el 10.11.2012.
- National Power & CERC. NP&C (2012). *Modelling wet deposition*. Disponible en: http://www.cerc.co.uk/environmental-software/assets/data/doc_techspec/CERC_ADMS4-p17_12.pdf. Consultado el 01.11.2012.
- Newsome, T., Aranguren, F. & R. Brinkmann. (1997). Lead concentration adjacent to roadways in Trujillo, Venezuela. *Professional Geographer*, 49 (3): 331 – 341.

- Pérez, K. C. (2003). *Caracterización geoquímica de las partículas totales suspendidas (PTS) en regiones urbanas (UCV-Caracas, Distrito Capital y Av. Bolívar norte – Av. Michelena, Valencia, estado Carabobo) y suburbanas (IVIC-Altos de Pipe, estado Miranda)*. Caracas: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química. Trabajo especial de grado.
- Ravichandran, M., Baskaran, M., Santschi, P. H. and T. Bianchi (1995). History of trace metal pollution in Sabine-Neches Estuary, Beaumont, Texas. *Environmental Science and Technology*, 29: 1495 – 1503.
- Sánchez, G. Y. (2000). *Análisis químico de partículas totales suspendidas, en el eje norte costero oriental (Guanta – Píritu)*. Caracas: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química. Trabajo especial de grado.
- Sarmiento, G. (1986). Los principales gradientes eco-climáticos en los Andes tropicales. *Anales del IV Congreso Latinoamericano de Botánica I*: p. 47–64. Medellín, Colombia.
- US-EPA (*United States – Environmental Protection Agency*). (1999). Compendium Method IO-2.1. Sampling of ambient air for total suspended matter (TSM) and PM₁₀ using Hi-Vol (HV) sampler. Office of Research and Development. EPA/625/R-96/010a. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/inorganic/mthd-2-1.pdf>. Consultado el 05.11.2012.

Carlos La Rosa. Profesor Asociado de la Facultad de Ciencias de la Universidad de los Andes. Lic. en Química en la ULA y Doctor en Ciencias (Químicas), *Apto Cum Laude*, en la Universidad Autónoma de Madrid. Investigador invitado en el Instituto de Ciencias de los Materiales de la CSIC. Asesorías a las Hidrológicas de Mérida, Trujillo y Barinas sobre calidad de aguas, aire y suelo. Co-Fundador del Laboratorio Regional de Servicios Analítica (LaRSA). Director-Jefe del Dpto. de Química de la Universidad de los Andes. Co-Fundador del Centro de Investigaciones Atmosféricas y del Espacio (CIAE). Co-Fundador del Proyecto Comunitario de Gestión Ambiental para el Desarrollo Sustentable de la Cuenca del Río Motatán. (PROCOGESTA). Co-Fundador del Foro del Cambio Climático de la ULA. Miembro de la Comisión de Asuntos Ambientales de la ULA (CUA). cjlarosa4@gmail.com.

Rigoberto Andressen. Profesor titular (J) de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes. Geógrafo graduado en la U.C.V., con estudios de postgrado en la Universidad de Wisconsin, E.U. (*M.A. Geografía*) y en la Universidad de Birmingham, Inglaterra (*M.Sc. en Meteorología*). Cursos de especialización en *Análisis Geográfico Integrado* del Instituto Internacional de Ciencias de la Geo-Información y Observación Terrestre (Universidad de Twente) Holanda y en *Agroclimatología* del Servicio Meteorológico de Israel. En la actualidad Profesor Visitante del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Investigador invitado en la Universidad de Colorado y Universidad de Massachusetts, E.U. Ha sido miembro del Comité Asesor del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, del Panel de Expertos en Cambio Climático (IPCC) y de la Comisión Nacional de Meteorología e Hidrología (CONICIT). Correo electrónico: andressen2005@hotmail.com.

Angel Contreras. Licenciado en Química (ULA). Lic. en Ciencias Naturales, Matemáticas y Tecnología (ULA). Docente del L.B. “Dr. Gerónimo Maldonado” Municipio Rivas Dávila Edo. Mérida. Miembro del Colectivo de Formación Docente e Investigación del Estado Mérida. Ministerio de Educación. Actualmente: Jefe Municipal de Educación. Municipio Rivas Dávila. Adscrito a la Zona Educativa N° 14. Mérida. Correo electrónico: aonecv@gmail.com.

Raiza Fernández. Doctora en Química, UCV. Magister Scientiarum en Química, (IVIC). Profesora en Química, egresada de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL) Caracas. Correo electrónico: raiza.fernandez@ciens.ucv.ve
