

Contaminación atmosférica por material particulado en avenidas de La Habana con alto flujo vehicular

LIC. JAVIER BOLUFÉ TORRES

Especialista en Meteorología

javier.bolufe@insmet.cu

MSC. ERNESTO R. CARRILLO VITALE

Especialista Superior en Meteorología

ernesto.carrillo@insmet.cu

Resumen

El material particulado constituye en muchas ciudades el contaminante más crítico, principalmente en zonas con alta concentración de automóviles. En este artículo se presentan los resultados de mediciones realizadas con el objetivo de determinar los niveles de contaminación atmosférica por material particulado menor de 10 micras, para el trayecto desde la confluencia de Paseo de Prado y Malecón hasta La Palma (intersección de las Calzadas 10 de Octubre, Porvenir, Managua y Bejucal), que incluye el tránsito por avenidas con alto flujo vehicular. Fueron realizadas mediciones (96) a intervalos de un minuto, en horas de la mañana. La media de las mediciones realizadas es superior a la concentración máxima admisible para una hora, constituyendo los tramos de Prado y 10 de Octubre entre Vía Blanca y Lacre los de menor y mayor deterioro de la calidad del aire, respectivamente, registrándose en este último los máximos valores instantáneos asociados a la alta presencia de buses y autos.

Abstract

Particulate matter in many cities is the most critical pollutant, especially in areas with high concentrations of cars. This paper presents the results of measurements made with the objective of determining the levels of air pollution by particulate matter less than 10 microns for the journey from the confluence of Paseo de Prado and Malecón to La Palma (intersection of Calzada 10 de Octubre, Porvenir, Managua and Bejucal), which includes traffic through avenues with high traffic flow. Were performed measurements (96) every one minute in the morning. The average of measurements carried out is higher than the maximum admissible concentration for one hour, the Prado and October 10 stretches between Vía Blanca and Lacre, being the ones with the lowest and highest deterioration of air quality. Maximum instantaneous values are associated to the high presence of cars and buses.

Palabras claves

Contaminación atmosférica, material particulado, flujo vehicular

Keywords

Air pollution, particulate matter, traffic flow

Introducción

El material particulado es uno de los contaminantes más significativos, el cual abarca un amplio espectro de sustancias, tanto sólidas como líquidas, con diferentes propiedades químicas en dependencia de su origen, y propiedades físicas como el tamaño, el cual constituye una variable fundamental para evaluar las consecuencias de este contaminante en la salud, por lo que a tal efecto se establecieron las partículas de diámetro aerodinámico igual o inferior a los 10 μm (PM_{10}) en 1979, como indicador ambiental, añadiéndose las 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) en 2000 por la Agencia de Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA) (Monsalve, 2011).

Los efectos agudos y crónicos del PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, en la morbilidad y mortalidad por enfermedades cardiovasculares, respiratorias y alérgicas han sido ampliamente estudiados en ciudades como Santiago de Chile (Grass y Cane. 2008), Lima (Defensoría del Pueblo, República del Perú. 2011), Mexicali (Ramírez-Rembao, Rojas y García-Cueto, R. 2009), Medellín (Universidad de Antioquía. 2007) y La Habana (Del Puerto, Molina, Bonito, Cabrera y Barceló. 2009).

La Habana, al igual que muchas ciudades del mundo, presenta problemas con el deterioro de la calidad del aire debido a la presencia de contaminantes atmosféricos que tienen diferentes repercusiones en el medio ambiente y la salud humana. Estudios realizados han arrojado que las mayores fuentes fijas emisoras de material particulado en La Habana lo constituyen la Empresa Siderúrgica Antillana de Acero y la Refinería Níco López, ubicadas en los municipios del Cotorro y Regla, respectivamente (Cuesta, *et al.* 2014).

Sin embargo, la contaminación atmosférica que existe en las ciudades procede mayoritariamente de las fuentes móviles, debido esencialmente al incremento en número y en potencia contrarrestando importantes mejoras tecnológicas aplicadas en los combustibles, lo que determina que la contaminación por material particulado constituye en muchas ciudades como Bogotá, el contaminante más crítico (Behrentz. 2009), debido a las emisiones relacionadas con la combustión en los automóviles. Este fenómeno es muy notable en ciudades asiáticas, principalmente de China, India y otras de América, como Ciudad de México (Molina. 2004).

En el interior de las ciudades o espacios urbanos hay un gran número de factores que influyen en la concentración de las partículas y otros contaminantes, entre los cuales se pueden citar el tamaño y conformación del parque vehicular, las concentraciones de fondo y la configuración o geometría de las calles, en especial el ancho de las mismas y el número de edificios contiguos. Estas características determinan la clasificación de estas calles en «calles abiertas» o «cañones urbanos», las cuales constituyen zonas con gran concentración de contaminantes (Lipp. 2014), en las cuales factores tales como la velocidad y dirección del viento predominante, así como

aspectos geométricos como la orientación y la altura de los edificios, entre otros, determinan el nivel de dispersión de estos contaminantes (Manzi, Belalcázar, Giraldo, Zárate y Clappier, 2003).

El flujo vehicular de La Habana se caracteriza por un número elevado de autos antiguos de la década de 1950 y 1960, denominados comúnmente «almendrones», los cuales utilizan en un alto porcentaje combustible diésel, el cual presenta una mayor emisión de partículas Manzi, Belalcázar, Giraldo, Zárate y Clappier, 2003). Por su parte, los vehículos pesados (camiones, ómnibus, etc) del sector estatal, equipados con motores de gran potencia y con deficiente mantenimiento y estado técnico, provocan altas emisiones de contaminaciones a la atmósfera.

Según los resultados de una campaña de monitoreo efectuada en julio de 2015 en la Avenida Simón Bolívar (Reina), estos autos presentan una frecuencia horaria entre un 30 y 40 % en los horarios de mayor tráfico (Cuesta, *et al.* 2017), muy superior a otros medios de transporte que usan combustible diésel como ómnibus y camiones con una frecuencia de aproximadamente 10% y 1% respectivamente, aunque con factores de emisión superiores.

El objetivo de este trabajo es la caracterización de la contaminación atmosférica por PM_{10} en un trayecto que incluya el paso por avenidas con alto flujo vehicular y con diferentes características geométricas a lo largo de las mismas.

Materiales y Métodos

Selección del Área de estudio

Las mediciones de la concentración de PM_{10} fueron realizadas en automóvil entre las 7:37 y 9:10 a.m., considerado un horario pico en el flujo vehicular, en el recorrido Paseo de Martí (Prado) y Ave. Antonio Maceo (Malecón)-La Palma (Figura 1), que incluye el tránsito por algunas de las avenidas de mayor flujo vehicular en La Habana: Prado, Ave. Máximo

Gómez (Monte), Ave. México (Cristina) y 10 de Octubre, las cuales atraviesan municipios de alta densidad poblacional (ONEI, 2015).

Para la selección del trayecto y las vías recorridas a realizar las mediciones, se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Elevado flujo de vehículos de composición variada (motocicletas, ómnibus medianos y grandes, camiones y automóviles de diversas décadas de fabricación y fuentes de procedencia).
- Número elevado de población residente y flotante expuesta directamente.
- Diversidad de secciones transversales y características geométricas a lo largo de las vías recorridas.

Clasificación de los trayectos

Las diferencias en las secciones transversales hacen referencia al número de carriles o sendas de cada vía, mientras que la geometría de la calle hace referencia a la altura y concentración de las edificaciones contiguas a las vías por lo que se clasifican en «cañón urbano» o «calles abiertas».

Para la clasificación de las calles (Figura 2), se utilizaron los criterios expuestos por algunos autores respecto a la relación entre la altura de la edificación (H) y el ancho de calle (W), variable que proporciona el aspecto general de las calles de la ciudad y es el elemento de diseño urbano que puede alterar positiva o negativamente las condiciones atmosféricas dentro de la ciudad.

Cuando esta relación (H/W) es superior a 0.5 se considera «cañón urbano», el aumento de esta relación es inversamente proporcional a la dispersión de los contaminantes. Otros descriptores geométricos que caracterizan las calles son: la orientación del cañón (θ) que describe el ángulo en grados del cañón respecto al eje Norte-Sur, el factor de visibilidad del cielo (SVF) y la longitud de la calle (L) (Lipp, 2014), los cuales no fueron considerados en este estudio.

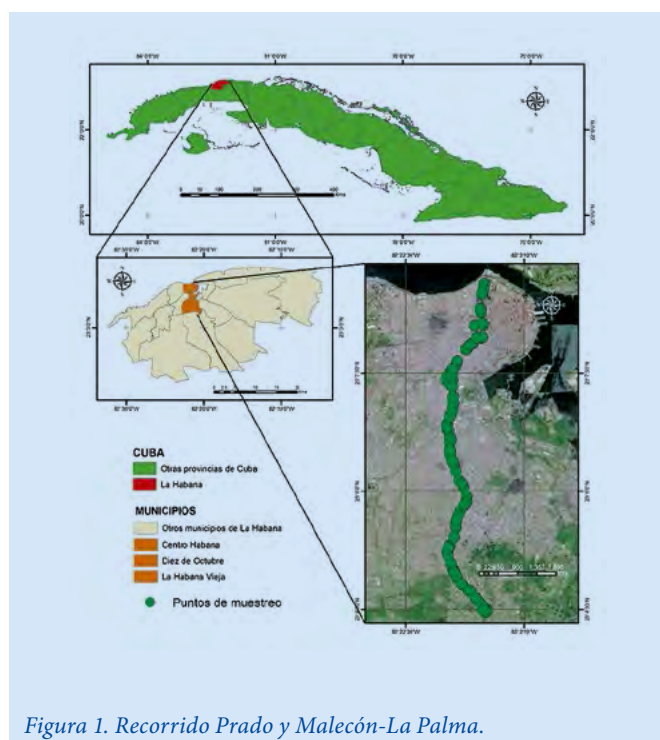


Figura 1. Recorrido Prado y Malecón-La Palma.

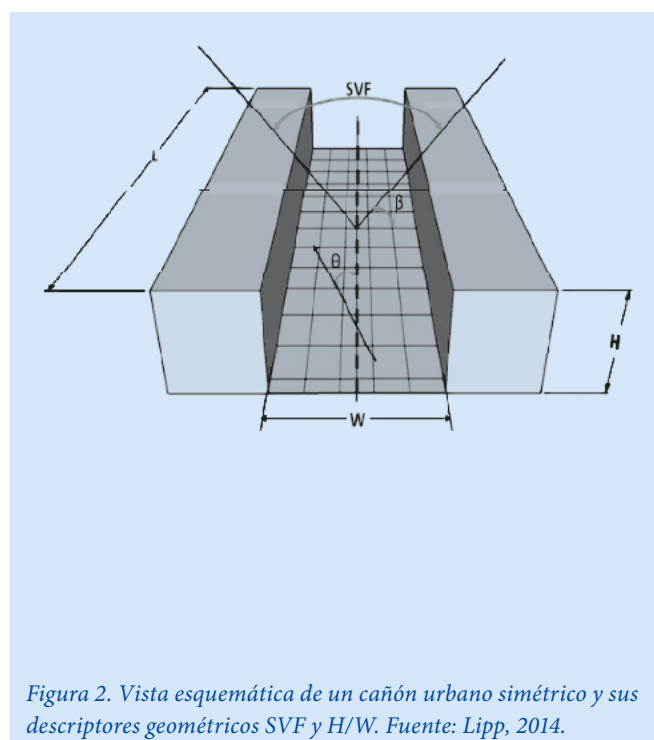


Figura 2. Vista esquemática de un cañón urbano simétrico y sus descriptores geométricos SVF y H/W . Fuente: Lipp, 2014.



Paseo del Prado.



Calzada de Monte.



Avenida de México (Cristina).

Figura 3. Avenidas que conforman el área de estudio.

Algunos sectores de las Calzadas de Monte, Cristina y Diez de Octubre, pueden ser clasificados como «cañón urbano» (Figura 3), condicionado por la altura de edificios de varias plantas ubicados a ambos lados de la vía y al ancho de las mismas (cuatro carriles), por lo que la relación altura de los edificios entre ancho de las vías es superior a 0.5. Estos factores contribuyen a la concentración de las emisiones de los vehículos, presentando una tendencia a quedar atrapadas al interior de dicho cañón. En contraste, las Avenidas Paseo

del Prado y un sector de Cristina se consideran «calles abiertas», esta última presenta en algunos sectores un ancho considerable con seis carriles, lo que podría influir en una mayor dispersión de los contaminantes emitidos por los vehículos.

El recorrido de aproximadamente ocho (8) kilómetros fue realizado cuatro (4) veces, con el objetivo de aumentar el número de muestras por intervalos, con un tiempo promedio de alrededor de 23 minutos para ser completado. En el caso de la Calzada de Diez de Octubre, se dividió en tres intervalos



En el caso de la Calzada de Diez de Octubre, se dividió en tres intervalos por las diferencias notables en su geometría y otros factores como la pendiente de la vía y la presencia de árboles.

por las diferencias notables en la geometría de los mismos y otros factores como la pendiente de la vía y la presencia de árboles (Tabla 1).

Equipo de medición

Para realizar las mediciones de PM_{10} fue utilizado el equipo THERMO MIE ADR-1500 de fabricación estadounidense, reconocida por sus buenas características tecnológicas para la medición de estos contaminantes atmosférico. Este equipo está diseñado para el monitoreo continuo en tiempo real (cada 1 minuto) mediante el método de fotometría de dispersión de la luz (Thermo Fisher Scientific Inc. 2009), de la concentración de partículas presentes en la atmósfera expresada en $\mu g/m^3$ o sea la millonésima parte de un gramo por metro cúbico y fue ubicado en el interior de un vehículo a menos de un metro de altura respecto a la calle.

Evaluación de la calidad del aire. Patrones de referencia

Para evaluar el nivel de contaminación atmosférica fue utilizado el índice de calidad del aire (ICA), según la Norma Cubana 111:2004 (Oficina Nacional de Normalización. 2004), equivalente al cociente de la concentración determinada para el contaminante y la concentración máxima admisible (CMA) correspondiente al período de tiempo evaluado ($200 \mu g/m^3$ para una hora) establecidas en la Norma Cubana 1020: 2014 (Oficina Nacional de Normalización. 2014). Este método cuantitativo permite conocer sobre la base del monitoreo el nivel de contaminación atmosférica del aire en los puntos de muestreo.

Fueron utilizados además parámetros de estadística descriptiva para los intervalos seleccionados, y los gráficos de cajas y bigotes *boxplots* para una mejor visibilidad de los

Tabla 1. Características de los intervalos que conforman el recorrido Prado y Malecón-La Palma

No	Intervalos	Mediciones (U)	Tiempo (min)	Longitud (km)
1	Ave. Paseo del Prado	10	2-4	1.41
2	Calzada de Monte	19	4-5	1.19
3	Ave. Cristina	14	3-4	1.37
4	Calzada de Diez de Octubre (Vía Blanca- Lactret)	19	4-6	1.86
5	Calzada de Diez de Octubre (Lactret-Café Colón)	19	4-6	1.05
6	Calzada de Diez de Octubre (Café Colón-La Palma)	15	3-4	1.22

resultados. El uso de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) a bordo del automóvil, permitió caracterizar la distribución espacial de las concentraciones de PM_{10} .

Análisis y discusión de resultados

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento altamente variable con una media aritmética ($231.4 \mu g/m^3$)

superior en un 15,7 % a la CMA horaria, por lo que existe una deficiente calidad del aire debido a la alta presencia de PM_{10} (Figura 4). Los episodios de mayor contaminación (superiores aproximadamente siete veces a los de menor concentración), se encuentran asociados a eventos de gran congestión en semáforos y zonas cercanas de buses y vehículos que operan con combustible diésel, especialmente aquellos denominados comúnmente «almendrones». En un 54,2% las mediciones

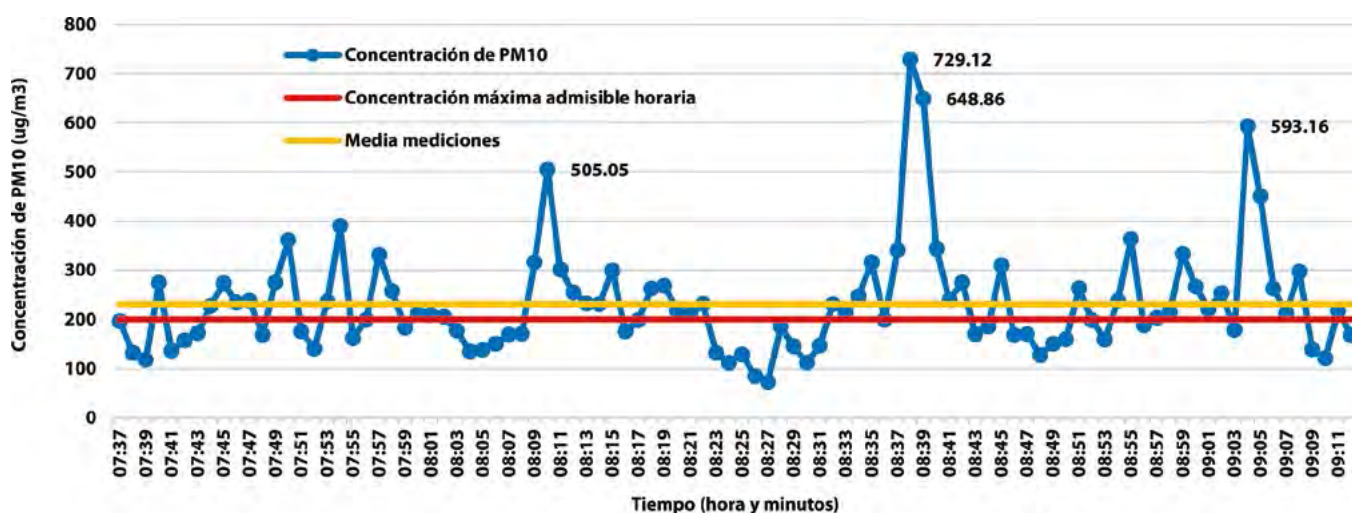


Figura 4. Mediciones instantáneas de la concentración de PM_{10} en el recorrido Prado y Malecón-La Palma.

instantáneas superan la CMA horaria, mientras que el 90 % de los casos superan los $133.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual refleja que los valores de alta concentración no constituyen episodios aislados.

Concentraciones de PM_{10} en los intervalos seleccionados

Las mediciones en los intervalos mencionados muestran diferencias significativas. Es apreciable el deterioro gradual de la calidad del aire con tres intervalos consecutivos clasificados, según los valores del ICA, como deficiente. La concentración de PM_{10} aumenta progresivamente desde Paseo del Prado hasta alcanzar el mayor valor promedio ($316.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), el mayor porcentaje de valores superiores a la CMA horaria (84.2 %) y el mayor ICA (158.4), en el primer tramo de la Calzada de Diez de Octubre, disminuyendo hasta alcanzar en el último intervalo valores cercanos a la Calzada de Monte (Tabla 2).

En el Paseo del Prado se reporta el menor valor promedio de todo el recorrido ($73.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$) superándose solamente en una ocasión la CMA horaria (10%) constituyendo el único intervalo con una calidad del aire clasificada como buena.

Estos valores pueden estar condicionados por las características geométricas de esta avenida, con un ancho considerable y algunos edificios altos pero muy espaciados, la presencia de árboles en toda su porción central y la cercanía del mar con un régimen de brisas que influye significativamente en la dispersión del material particulado.

La media en todos los intervalos es superior a los resultados obtenidos en estudios realizados en la Calle Reina los cuales oscilaron entre 90 y $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el mismo horario de la mañana (Cuesta, *et al.* 2017).

En la Figura 5 se observa como los tres máximos valores en todo el recorrido correspondieron al cuarto intervalo

Tabla 2. Concentración de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y nivel de calidad del aire en el recorrido Prado y Malecón-La Palma

Intervalos	Media	ICA	Clasificación	Superior CMA (%)
Avenida Paseo del Prado	143.8	71.9	Buena	10.0
Calzada de Monte	193.6	96.8	Aceptable	52.6
Avenida Cristina	258.5	129.3	Deficiente	71.4
Calzada Diez de Octubre (Vía Blanca-Lacret)	316.8	158.4	Deficiente	84.2
Calzada Diez de Octubre (Lacret-Café Colón)	246.5	123.2	Deficiente	52.6
Calzada Diez de Octubre (Café Colón-La Palma)	185.2	92.6	Aceptable	33.3

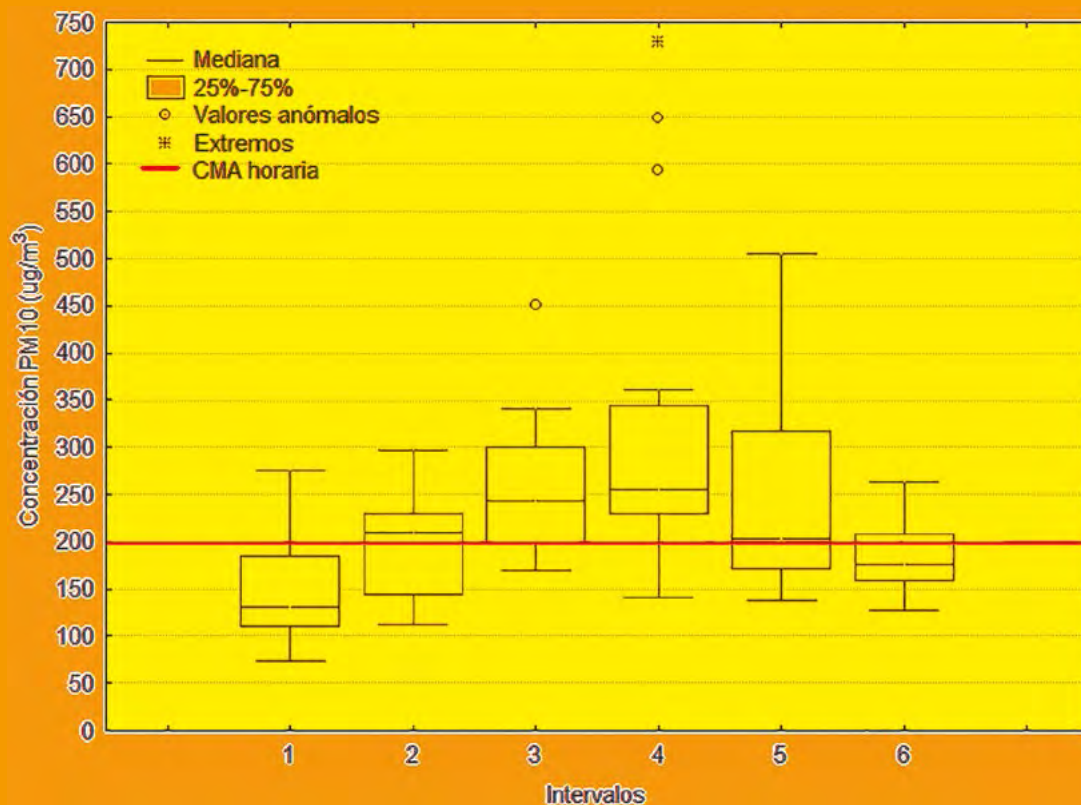


Figura 5. Distribución de las mediciones en cada intervalo del recorrido Prado y Malecón-La Palma.

(Calzada de Diez de Octubre entre Vía Blanca y Lacre) con un máximo de $729.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual constituye un valor extremo para el intervalo mientras que los máximos relativos ($648.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $593.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$) son valores anómalos. Solamente en tres ocasiones, se registraron valores superiores al máximo absoluto en diez días continuos de mediciones en la citada campaña de medición realizada en la Calle Reina (Cuesta, *et al.* 2017), lo que permite apreciar la dimensión del deterioro de la calidad del aire en la Avenida Diez de Octubre, especialmente en el tramo seleccionado.

Los valores máximos fueron registrados en los tramos de este intervalo con el efecto de «cañón urbano». Se aprecia el aumento de los valores mínimos registrados a medida que se avanza en el recorrido con una estabilización al final del mismo, estando en todos los casos por debajo de la CMA horaria, valor superado por el valor central o mediana en todos los intervalos a excepción del 1 y 6.

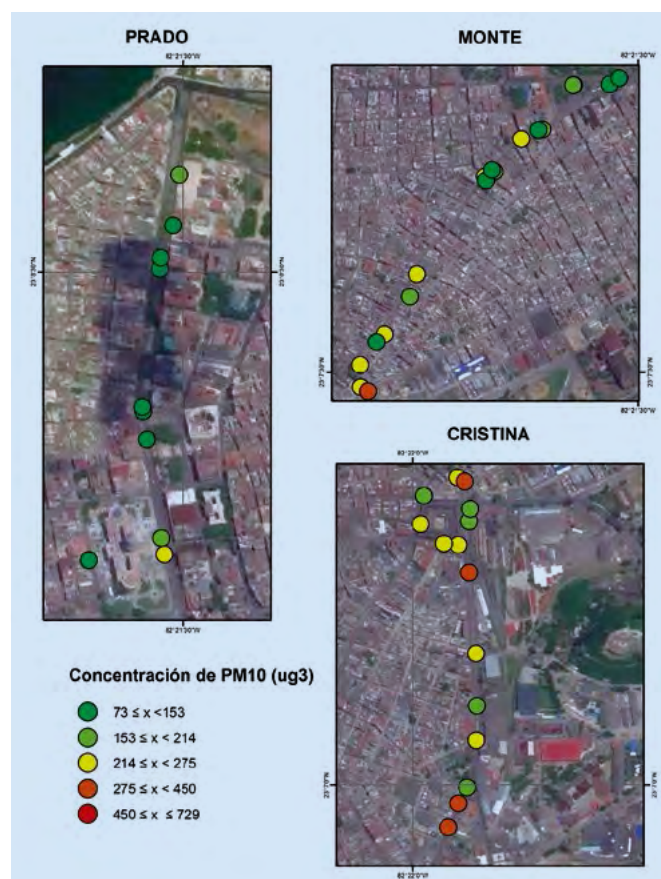


Figura 6. Distribución espacial de las mediciones en los intervalos de Paseo del Prado, Calzada de Monte y Avenida de Cristina.

En las Figuras 6 y 7 se observa que la distribución espacial de las mediciones superiores a la CMA horaria sigue un comportamiento regular marcada por la presencia de semáforos, patrón muy evidente en la intercepción de la Calzada de Monte y la Avenida de Cristina con una sección curva con valores relativamente notables. En esta última avenida se observa gran variabilidad de las mediciones, característica condicionada por los tramos con efecto de «cañón urbano» y «calles abiertas» en la misma.

Este agrupamiento de valores elevados se presenta con gran énfasis en La Calzada de Diez de Octubre, especialmente en el primer sector con los mayores valores en todo el recorrido, y de forma más aislada en el segundo sector, en el cual un número considerable de valores registrados cerca de semáforos e intercepciones de calles importantes no superan la CMA al igual que ocurre en el tramo final de esta Calzada.

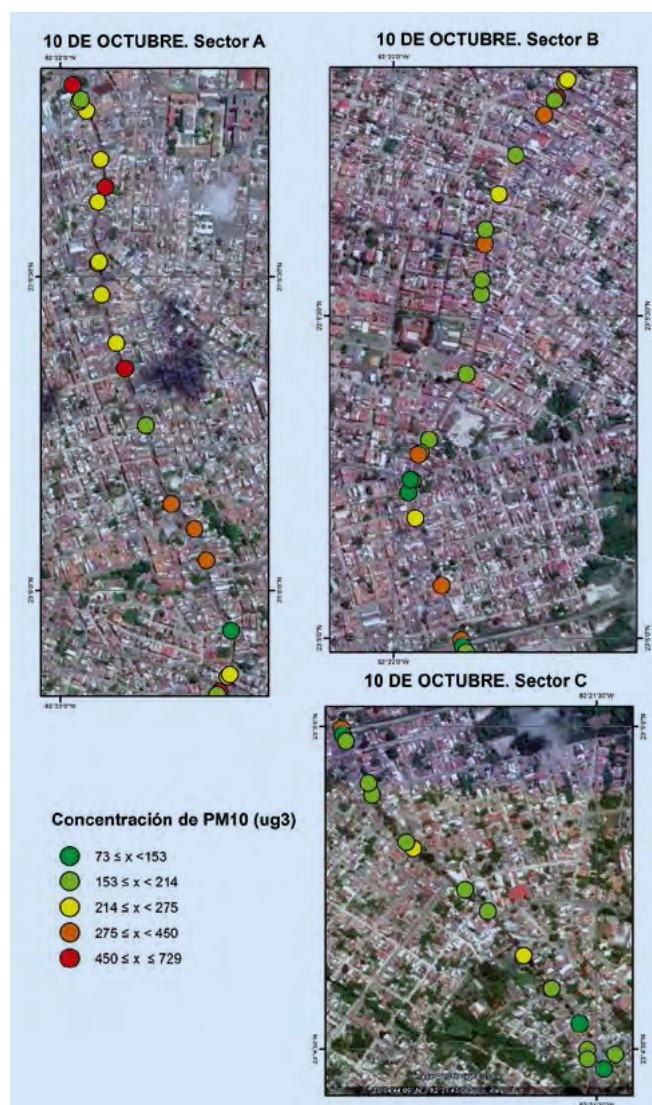


Figura 7. Distribución espacial de las mediciones en los sectores seleccionados de la Calzada de Diez de Octubre.

Conclusiones

A partir de las mediciones realizadas se logró una caracterización de la concentración de PM_{10} en el recorrido Prado y Malecón-La Palma. Este trayecto presenta una calidad del aire catalogada como deficiente, según las Normas de Calidad del Aire vigentes en Cuba, por la presencia de este contaminante atmosférico en valores superiores a la CMA horaria. Los mayores valores registrados se encuentran asociados a eventos de gran congestión en semáforos y zonas cercanas de buses grandes y vehículos que operan con combustible diésel en los sectores donde se aprecian el efecto de «cañón urbano».

Se evidenció la validez de la división hecha por intervalos, según las calles recorridas y otras características como la geometría de las calles, las secciones transversales y la pendiente de inclinación, en el caso específico de la Calzada de Diez de Octubre, por el comportamiento tan variable entre los mismos constituyendo según los diversos parámetros evaluados, el Paseo del Prado y la Calzada de Diez de Octubre entre Vía Blanca y Lacret los sectores de menor y mayor contaminación atmosférica por PM_{10} .

Referencias

- BEHRENTZ, E. (2009). *Impacto del sistema de transporte en los niveles de contaminación percibidos por los usuarios del espacio público*. Revista de Arquitectura. Consultado: 18 de julio de 2016 en http://dearq.uniandes.edu.co/sites/default/files/articles/attachments/DeArq_04_-_15_Behrentz.pdf.
- DEFENSORÍA DEL PUEBLO, REPÚBLICA DEL PERÚ (2011). *Calidad del aire en Lima y su impacto en la salud y la vida de sus habitantes*. Capítulo 5. Consultado: 20 de Julio de 2016, http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/informe_116.pdf.
- DEL PUERTO, C., MOLINA, E., BONITO, L., CABRERA, A. Y BARCELÓ C. (2009). *Contaminación del Aire y Salud*. La Habana: Editorial Ciencias Médicas. (Parte II, pp 93-108).
- CUESTA, O. et al., (2014). *Informe Científico Resultado del Proyecto «Diagnóstico del medio ambiente atmosférico producto de las principales fuentes fijas de la ciudad de La Habana»* Instituto de Meteorología (Capítulo 3, epígrafe 3, pp 76).
- CUESTA, O. et al. (2017). «Contaminación atmosférica por fuentes móviles en la calle Reina, La Habana», Revista Cubana de Meteorología, Vol. 23, No. 1, pp. 78-88, 2017, ISSN: 0864-151X.
- EN ACCIÓN (2016). *La calidad del aire en el Estado español durante 2015*. pp 14 y 30. Consultado: 20 de julio 2016, <https://www.ecologistasenaccion.org/IMG/pdf/informe-calidad-aire-2015.pdf>.
- GRASS D. Y CANE M. (2008). *The effects of weather and air pollution on cardiovascular*. International journal of Climatology. Consultado: 12 de mayo de 2016, <http://www.interscience.wiley.com> DOI: 10.1002/joc.1592.
- LIPP, D. (2014). *El cañón urbano su incidencia en la contaminación del aire*. Congreso Internacional de Geografía, (pp. 123-128). San Juan, Argentina. Consultado: 12 de mayo 2016, http://www.gaea.org.ar/Actas2014_Lipp.pdf
- MANZI, V., BELALCÁZAR, L. C., GIRALDO, E., ZÁRATE, E., Y CLAPIER, A. (2003). *Estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles de la ciudad de Bogotá*. Revista de Ingeniería, (18), 18-25. Consultado: 19 de abril 2016, <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/viewFile/476/657>.
- MOLINA L.(2004). *Megaciudades y contaminación atmosférica*. Consultado: 20 julio 2016, http://www.metropolis.org/sites/default/files/c4_metropolis_megaciudades.pdf
- MONSALVE, F.(2011). *Influencia del tiempo y de la contaminación atmosférica sobre enfermedades de los sistemas circulatorio y respiratorio en Castilla-La Mancha* (Tesis de Doctorado, Universidad de León, España), Capítulo 1, pp. 10: consultado 12 de mayo, 2016, <https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/1761/2011MONSALVE%20IRUSTA%2c%20FEDERICO.pdf?sequence=1>
- NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (2004) NC: 111: 2004: *Calidad del Aire. Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos*, La Habana, Cuba. (pp. 11).
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (2014) NC: 1020: 2014: *Calidad del aire-contaminantes-Concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables*, La Habana, Cuba (pp. 10).
- OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS E INFORMACIÓN, ONEI (2015). *Anuario estadístico La Habana*, Consultado: 18 de abril 2016, <http://www.onei.cu/aed2014/23La%20Habana/03-Poblaci%C3%B3n.pdf>
- RAMÍREZ-REMBAO, M., ROJAS, R. Y GARCÍA-CUETO R. (2009). *Influencia de los Contaminantes Atmosféricos en las Infecciones Respiratorias Agudas en Mexicali-Baja California, México*. Información Tecnológica, 20 N° 3, 89-100. Consultado: 20 de julio de 2016, <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v20n3/art11.pdf>, doi: 10.1612/inf.tecnol.4060it.08)
- THERMO FISHER SCIENTIFIC INC (2009), MIE ADR-1500 *Instruction Manual Particulate Monitor*. Consultado: 12 de mayo 2016 en <http://www.thermo.com/aqi>
- UNIVERSIDAD DE ANTIOQUÍA (2007). *Contaminación Atmosférica y efectos sobre la salud de la población Medellín y su área metropolitana*. Documento 3 y 4. Consultado: 20 de julio 2016, <https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/wpcc/ontent/Sites/Subportal%20del%20Ciudadano/Salud/Secciones/Publicaciones/Documentos/2012/Investigaciones/> ■

