

Metodología simplificada para estimación de concentraciones ambientales de PM10 a partir de fuentes móviles. Caso de estudio: avenida simón bolívar



Simplified methodology for estimating environmental concentrations of PM10 from mobile sources. Case study: avenida simón bolívar

<https://eqrcode.co/a/YNMYti>

Aliet Jiménez-Delgado¹, Elieza Meneses-Ruíz¹, Alina Roig-Rassi¹, Anel Hernández-Garcés²

¹Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, La Habana, Cuba

²Empresa Laboratorios MEDSOL, La Habana, Cuba

RESUMEN: La calidad del aire es uno de los problemas más importantes a los que se enfrentan los países del mundo y uno de los retos priorizados a solucionar por la sociedad actual. Cuba no es una excepción en este sentido asumiendo a La Habana como una de sus ciudades más contaminadas debido a las características del parque vehicular, máximo responsable de las elevadas concentraciones de PM10 en el aire. Se presenta una metodología simplificada para la estimación de las concentraciones ambientales de PM10 a partir de fuentes móviles y se analiza cómo caso de estudio la Avenida Simón Bolívar en el horario diurno (7:00 - 18:00) empleando el modelo gaussiano. La capacidad del modelo de simular con adecuada precisión se demostró mediante la aplicación de diferentes estadígrafos. Las emisiones obtenidas, teniendo en cuenta el flujo vehicular y factores de emisión conocidos, demostraron que los vehículos de mayor emisión fueron los vehículos pesados que utilizan mayor porcentaje de combustible diésel. Los vehículos más ligeros, como las motos, fueron los vehículos de menor emisión ya que, además de utilizar gasolina, presentaron poca frecuencia en el área de estudio en comparación con los restantes tipos de vehículos. Las concentraciones ambientales de PM10 obtenidas a partir del modelo gaussiano, según los estadígrafos empleados, presentan una sutil tendencia a sobreestimar las concentraciones reales, pero de manera general existen pocas diferencias entre ellas.

Palabras clave: calidad del aire, fuentes móviles, concentraciones de PM10.

ABSTRACT: Air quality is one of the most important problems facing the countries of the world and one of the prioritized challenges to be solved by today's society. Cuba is no exception in this regard, assuming Havana as one of its most polluted cities due to the characteristics of the vehicle fleet, which is most responsible for the high concentrations of PM10 in the air. A simplified methodology is presented for the estimation of the environmental concentrations of PM10 from mobile sources and it is analyzed as case study the Simón Bolívar Avenue during the daytime (7:00 - 18:00) using the Gaussian model. The ability of the model to simulate with adequate precision was demonstrated by applying different statisticians. The emissions obtained, taking into account the vehicle flow and known emission factors, showed that the vehicles with the highest emissions were heavy vehicles that used the highest percentage of diesel fuel. The lighter vehicles, such as motorcycles, were the vehicles with the lowest emissions since, in addition to using gasoline, they presented little frequency in the study area compared to the other types of vehicles. The environmental concentrations of PM10 obtained from the Gaussian model, according to the statistics used, present a subtle tendency to overestimate real concentrations, but in general there are fewer differences between them.

Keywords: air quality, mobile sources, concentrations of PM10.

Correspondencia a: aliet@cubaenergia.cu, emeneses@cubaenergia.cu, arrassi@cubaenergia.cu

Recibido: 16/10/2019

Aceptado: 07/07/2020

INTRODUCCIÓN

Las emisiones liberadas por fuentes móviles, son una de las causas de la presencia de contaminantes en la atmósfera. La bibliografía internacional notifica que los porcentajes de los vehículos de motor provocan más del 80 % de la contaminación en las ciudades. Según la Guía simplificada del informe sobre cambio climático del IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático) 2007, en los últimos 10 años, las emisiones en ese sector han aumentado mucho más rápido que en cualquier otro sector que utilice energía. Se prevé que el transporte siga creciendo aceleradamente en las próximas décadas, de modo que las emisiones se elevarían en un 80 % para el 2030 en relación con los niveles actuales ([IPCC, 2007](#)).

Este fenómeno es muy notable en ciudades asiáticas, principalmente de China, India y otras de América, como Ciudad de México, ([Molina, 2004](#)). Por otro lado, La Habana, es una de las ciudades más contaminadas de Cuba. Sus principales fuentes fijas contaminantes son: la refinería Níco López, la termoeléctrica de Tallapiedra y la Antillana de Acero; además de numerosos grupos electrógenos. A todo esto, es necesario adicionar el papel del transporte automotor ([Cuesta et al., 2014](#)).

El flujo vehicular de La Habana se caracteriza por proceder de diferentes países y tener un variado conjunto de técnicas de fabricación, un envejecimiento técnico, tecnologías de baja eficiencia energética que promueve altos niveles de los contaminantes clásicos del aire (CO, SO₂, NO_x, O₃, PM, Pb), deficientes mantenimientos y uso de combustibles fósiles de baja calidad ([Milanés, 2013](#)). Además, presenta un elevado número de autos antiguos de la década de 1950 y 1960, los cuales utilizan en un alto porcentaje de combustible diésel, dando lugar a una mayor emisión de partículas. Por otra 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.

En Cuba existen varios trabajos que abordan el tema de la calidad del aire (Romero et al., 2006; [Schattanek, 2008](#); Martin et al., 2009; [Vidal, 2017](#)) y su vínculo con la salud humana y sus efectos sobre el ambiente en general. Por otro lado, vinculados al flujo automotor se han realizados modelaciones e investigaciones de calidad del aire por investigadores a nivel local. Entre los más importantes se tiene ([Paz et al., 2008](#); [Cuesta et al., 2017](#); [Madrado et al., 2018](#)), siendo los dos últimos la base principal del desarrollo de esta investigación, pues:

La investigación realizada por Cuesta et al., en el año 2015, permitió conocer que, en la Avenida Simón Bolívar, el PM₁₀ y el NO₂ presentaba valores por encima de la CMA diaria establecida en la NC 1020: 2014, que el comportamiento del flujo vehicular diurno se considera alto en la zona y que existen correlaciones significativas entre el flujo vehicular y el PM₁₀. La investigación realizada por [Madrado et al., en el año 2018](#) en la Avenida Simón Bolívar, fue diseñada para estimar los factores de emisión de los diferentes tipos de vehículos a partir de las mediciones de los flujos de tráfico, la velocidad y la dirección del viento en la calle y los niveles de concentración de contaminantes mediante el uso de dispositivos de bajo costo.

En este artículo se presenta una metodología simplificada empleada para estimar las concentraciones ambientales de PM₁₀ a partir las emisiones de fuentes móviles en un caso de estudio: la avenida Simón Bolívar. Se utiliza un modelo gaussiano como alternativa para determinar las concentraciones a partir de la cantidad de vehículos teniendo en cuenta los factores de emisión determinados por [Madrado et al., en el año 2018](#).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Se desarrolló una campaña en la Avenida Simón Bolívar, municipio Centro Habana, específicamente en el tramo comprendido desde Belascoaín (23°07'56.73''N y 82°21'46.84''W) hasta Galiano (23°07'55.18''N y 82°22'10.22''W), durante los días del

11 al 17 de noviembre de 2018, en horario diurno (de las 7 a las 19 horas), con el fin de conocer el flujo vehicular para luego determinar las concentraciones de PM10 emitidas por estas fuentes en dicha área.

El punto de muestreo se seleccionó de forma tal que los equipos estuvieran expuestos directamente al flujo vehicular y equidistante de las calles transversales, tomando como referencias otros trabajos realizados en esta temática ([Belalcazar et al., 2010](#)).

Caracterización del área de estudio

La Avenida Simón Bolívar, es una legendaria calle de La Habana. Esta avenida tiene una extensión de 600 m y se caracteriza por la presencia de antiguos y grandes edificios, de varios estilos arquitectónicos en ambas aceras. Fue seleccionada esta vía tomando en cuenta los siguientes criterios:

1. Alto flujo de vehículos de diversas características durante todos los horarios.
2. Las características geométricas de la calle (altura de los edificios aledaños y el ancho de la vía) propician el efecto de “cañón urbano”, lo que favorece que las emisiones vehiculares presenten una tendencia a permanecer en el interior de la vía ([Lipp, 2014](#)).
3. Número elevado de población residente y flotante expuesta directamente a los contaminantes.
4. Orientación perpendicular a la dirección del viento predominante lo cual minimiza la dispersión de los contaminantes emitidos por los vehículos.

Obtención de los datos

Los datos de las concentraciones de PM10 emitidas por fuentes móviles en el área de estudio se obtuvieron utilizando el Aeroqual AQM65 para de esta forma comparar las estimadas por la metodología con valores reales medidos.

El Aeroqual AQM65 es una estación compacta de calidad del aire diseñada para medir con

precisión la contaminación ambiental y las condiciones ambientales. En la [figura 1](#) se muestra el equipo AQM65 empleado. Este muestreador se encontraba ubicado a 1.5 m del suelo y pegado a la vía por lo cual estuvo influenciado de emisión directa de los diferentes tipos de vehículos.



Figura 1. Aeroqual AQM65 ubicados en ambos lados de la calle Reina

Los datos de velocidad del viento fueron adquiridos con la implementación de una estación meteorológica PCE-FWS20 en el área de estudio.

El registro automotor se realizó por conteo directo de los diferentes tipos de vehículos durante 20 minutos en una hora, en ambos sentidos de la vía de estudio, luego se multiplicaron por tres para tener un estimado de la frecuencia en una hora. Se implementó el uso de cámara fotográfica en arcos de registrar el conteo para posibles verificaciones. Los diferentes tipos de vehículos se establecieron según la metodología utilizada en las investigaciones bases:

1. Motos (independiente del año de fabricación)
2. Vehículos modernos (fabricados desde el 1996 a la fecha)
3. Vehículos americanos (fabricados entre 1940 a 1958)
4. Vehículos rusos (fabricados entre 1966 a 1990)
5. Vehículos pesados (independiente del año de fabricación)

Métodos

Obtención de los valores de emisión de PM10 a partir de factores de emisión (FE) conocidos para cada tipo de vehículo

Los valores de emisión de PM10 de cada tipo de vehículos se calcularon usando el método de factores de emisión. Para esto se empleó la [ecuación 1](#):

$$E = FE \cdot NV \quad (1)$$

Donde:

E - valor de emisión

FE - factor de emisión

NV - número de vehículos

Para este trabajo se utilizaron los factores de emisión por tipo de vehículos determinados por ([Madrado et al., 2018](#)) en el estudio “Metodologías de bajo costo para estimar los factores de emisión de vehículos”. Estos se muestran en la [tabla 1](#).

Tabla 1. Factores de Emisión empleados para cada tipo de vehículo

Tipo de Vehículo	FE (mg km ⁻¹ veh ⁻¹)
Motos	11.1 ± 2.7
Vehículos modernos	90.6 ± 11.2
Vehículos americanos	125.4 ± 18.5
Vehículos rusos	125.4 ± 18.5
Vehículos pesados	415.1 ± 31.2

Modelo utilizado

El modelo que se utilizó en la investigación para determinar las concentraciones de PM10 en el área de estudio fue el modelo Gaussiano o de Penacho gaussiano. Numéricamente, el modelo se basa en la descripción tridimensional del campo de concentraciones generado por una fuente puntual en condiciones meteorológicas estacionarias; las emisiones se consideran asimismo continuas. La distribución de las concentraciones adopta la forma de una campana de Gauss y su ecuación, desarrollada de forma semi-empírica, puede ser descrita:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (2)$$

Donde:

C - es la concentración en el punto (x, y, z) originada por la fuente de emisión en g/m³

Q - es la velocidad de emisión en g/s

σ_y y σ_z - son las desviaciones estándar, tanto horizontal como vertical, de la distribución de las concentraciones

u - es la velocidad media del viento en la dirección del eje x (dirección del viento), en m/s

H - es la altura efectiva de emisión, esto es, la altura a la cual el penacho deja de elevarse, medida en m.

La utilización de la expresión anterior supone la aceptación de una serie de supuestos:

1. las condiciones meteorológicas (atmosféricas) se suponen homogéneas y estacionarias en toda el área
2. el proceso es estacionario, esto es, la concentración no es función del tiempo, sino que depende de la distancia al foco emisor y del viento
3. el eje x es paralelo a la dirección media del viento
4. el viento es constante en cualquier punto del sistema de coordenadas (x,y,z) y no tiene componente vertical
5. la superficie de la tierra es plana y no afecta a la velocidad del viento
6. los efectos de la difusión turbulenta son despreciables comparados con el transporte por el viento

Adaptación del modelo para el caso del tráfico

Para adaptar la ecuación general gaussiana al caso de una fuente lineal como el tráfico, se han asumido algunas simplificaciones. En primer lugar, la variable tridimensional puede eliminarse del cálculo (z=0), pues el control de los valores de la concentración de contaminantes se realiza allí donde dicha contaminación pueda afectar a la población. La altura de la fuente emisora se ha

Tabla 2. Clases de estabilidad de Pasquill

Veloc. Viento a 10m de altura	Soleamiento diurno			Condiciones nocturnas	
	Fuerte	Moderado	Ligero	Nublado en su mayoría	Despejado en su mayoría
< 2m/s	A	A-B	B	-	-
2 m/s	A-B	B	C	E	F
4 m/s	B	B-C	C	D	E
6 m/s	C	C-D	D	D	D
> 6 m/s	C	D	D	D	D
A: muy inestable	C: ligeramente inestable		E: ligeramente estable		
B: bastante inestable	D: neutra		F: bastante estable		

considerado despreciable en el caso del tráfico. Por lo que la ecuación principal se simplifica a la ecuación 3.

$$C(x, y) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zu} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{0-0}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{0-0}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zu} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \{1 + 1\} = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_zu} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad (3)$$

El tráfico como origen de emisiones puede considerarse como una fuente lineal continua, de emisión infinita; esto significa que, si se considera cada elemento diferencial de la línea (la calle o carretera) como una fuente puntual, el resultado es una alineación de puntos a los cuales se puede aplicar la ecuación anterior. La concentración debida a la línea completa será la integración de las infinitas concentraciones puntuales y la concentración en un punto (x,y) corresponde a la siguiente integral:

$$C(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_zu} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] dy \quad (4)$$

Resolviendo la integral, la ecuación del modelo de dispersión queda de la siguiente manera:

$$C(x) = \frac{Q}{\sigma_zu} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \quad (5)$$

Donde:

C - es la concentración del contaminante considerado en g/m³

Q - es la velocidad de emisión de contaminantes en g/s·m

u - es la velocidad del viento en m/s

σ_z - es la desviación estándar vertical (en m)

Para estimar los valores de concentración se emplearon los valores promedio de la velocidad del viento por hora para cada día (u).

Cálculo de la desviación estándar (σ_z) según método Brookhaven

El modelo para el caso del tráfico está determinado fuertemente por la parametrización de la función σ_z, que dependen de la dirección del viento, situado en el eje x, y del tipo de terreno (rural o urbano, llano o complejo). Esta evaluación es la que introduce mayor incertidumbre en el modelo puesto que en este caso no se dispone de la cantidad de datos reales suficientes para determinarlas, por lo cual fue preciso recurrir al método de las estimaciones semiempíricas.

Las curvas de Pasquill-Gifford, permiten determinar previamente la categoría de estabilidad atmosférica (tabla 2).

De todos los procedimientos para realizar la evaluación semiempírica se utilizó el método de Brookhaven que plantea que la desviación estándar vertical tiene la expresión σ_z = a · x^b (en m), siendo a y b parámetros dependientes del tipo de estabilidad atmosférica (tabla 3) y x la distancia, en m, a la fuente emisora.

Tabla 3. Coeficientes a y b utilizados para el cálculo de σ_z según el método de Brookhaven

Clases de estabilidad de Pasquill	σ_z	
	a	b
A (muy inestable)	0.41	0.91
B y C (inestable)	0.33	0.86
D y E (neutra o estable)	0.22	0.78
F(bastante estable)	0.06	0.71

Para el cálculo de la desviación estándar vertical se determinó que el área de estudio presentaba características de inestabilidad atmosféricas por lo cual según los coeficientes de Brookhaven: $a=0.33$ y $b=0.86$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del flujo vehicular

Los datos disponibles sobre volúmenes de tráfico para ambas direcciones del área de estudio cubren partes significativas de días laborables del período analizado y se han utilizado para producir un perfil de flujo de tráfico diurno promedio comprendido entre las 7:00 y 18:00 horas.

Análisis del flujo vehicular por hora

El análisis de la [figura 2](#) muestra el comportamiento por hora de los diferentes tipos de vehículos. Este presenta una tendencia a aumentar su frecuencia en los horarios comprendidos entre las 07:00 y 09:00 horas, así como entre las 11:00 y 12:00 horas y las 17:00 y 18:00 horas, lo cual se puede asociar con el horario laboral. Los vehículos modernos y americanos presentaron mayor frecuencia en los diferentes horarios analizados mientras que las motos presentaron menor frecuencia.

Análisis del flujo vehicular por día

El análisis de la [figura 3](#) muestra el comportamiento diario de los diferentes tipos de vehículos en el período de estudio. Los tipos de vehículos modernos y americanos presentaron mayor frecuencia durante el período de estudio y se muestra un aumento significativo de los diferentes

tipos de vehículos en los días 15 y 16 de noviembre de 2018, resultado de que en los comienzos del mes de noviembre predominó la influencia de las altas presiones oceánicas con centro sobre el Atlántico occidental, y en la mañana del día 15 llegó un frente al occidente del país (**Resumen sinóptico mensual**, noviembre 2018). Esta situación provocó que la vía del malecón se cerrara y el área de estudio se convirtiera en una vía alternativa para el tráfico.

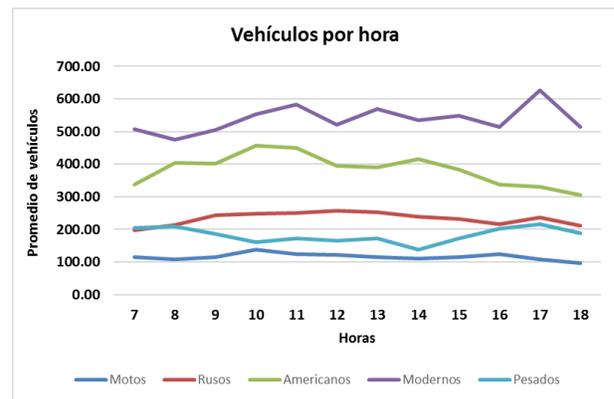


Figura 2. Relación de la frecuencia horaria promedio de cada tipo de vehículo

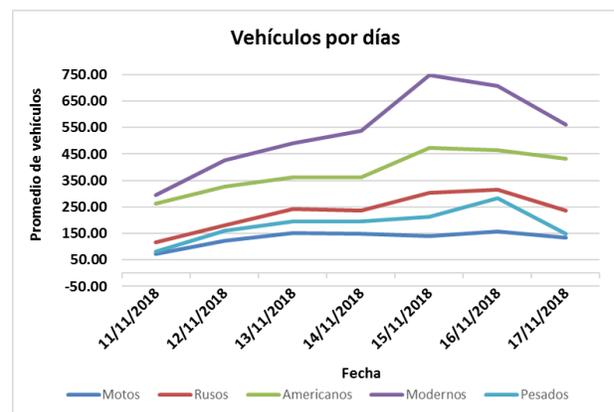


Figura 3. Relación de la frecuencia diaria promedio de cada tipo de vehículo

Análisis del comportamiento de la velocidad del viento

La [figura 4](#) muestra que en el período de estudio como promedio por hora la velocidad del viento osciló entre los 3.45 y 5.46 Km/h, registrándose el menor valor a las 7:00 horas y el máximo a las 12:00 horas.

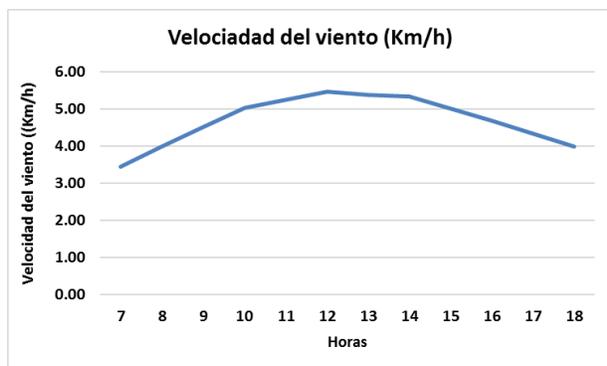


Figura 4. Comportamiento promedio por hora de la velocidad del viento

Evaluación según la norma NC 1020:2014 de las concentraciones de PM10 medidas con el AQM65

El PM10 presentó valores promedios horarios (figura 5) entre 35 y 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el horario diurno (7:00 - 18:00 horas). Estos valores solo se promediaron para las 12 horas y a pesar del abundante flujo vehicular, se encontraron por debajo de la cuarta parte de la CMA de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido para valores horarios en la NC 1020: 2014.

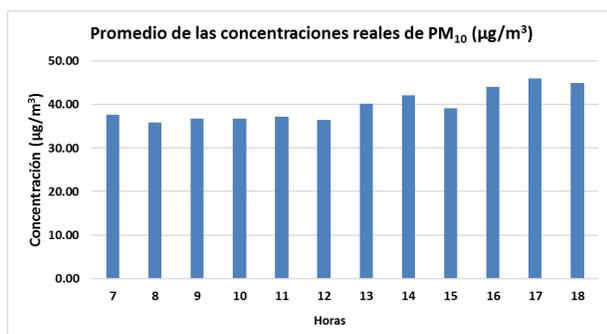


Figura 5. Promedio horario de las concentraciones de PM10

Este resultado es mejor que el obtenido en la campaña realizada en el área de estudio en el período comprendido entre los días 13 y 23 de julio de 2015 (Cuesta et al; 2017), donde la calidad del aire presentó valores de PM10 por encima de la CMA diaria (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) establecida en la norma NC 1020:2014. Cabe destacar que ese trabajo fue realizado en un mes de verano donde las

temperaturas elevadas provocan que las partículas finas permanecen más tiempo en suspensión, mientras que los nuevos datos utilizados fueron obtenidos en el mes de noviembre.

Emisiones de PM10 estimadas

En la figura 6 se muestran que los vehículos que presentaron mayor emisión fueron los vehículos pesados, pues estos utilizan mayor porcentaje de combustible diésel, dando lugar a una mayor emisión de partículas.

Los vehículos de menor emisión fueron las motos pues estas, además de utilizar gasolina, presentaron poca frecuencia en el área de estudio en comparación con los restantes tipos de vehículos.

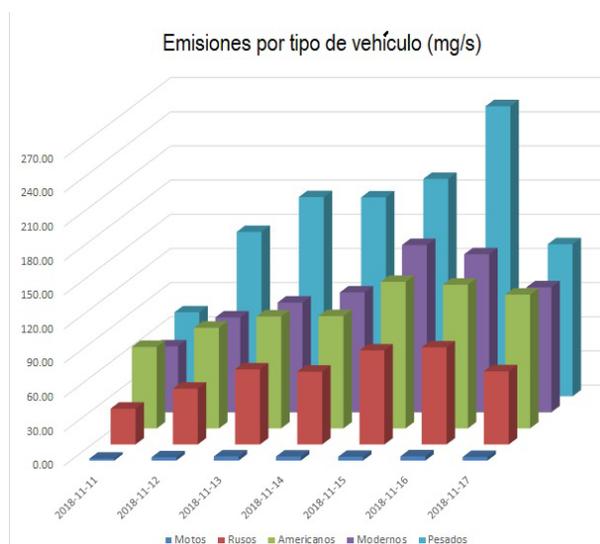


Figura 6. Emisiones calculadas para cada tipo de vehículo

Resultados de la modelación

Para cumplir con el objetivo general de la investigación se calcularon las concentraciones de PM10 por hora para los 7 días analizados a partir de la ecuación 5. La figura 7 muestra el promedio por hora de las concentraciones de PM10 obtenidas en el área de estudio en el período de análisis.

Del análisis de la figura anterior se concluye que el promedio diurno (12 horas) de las concentraciones de PM10 obtenidas se comportó

entre 35 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo cual el modelo empleado muestra que dichas concentraciones no exceden la norma establecida para 24 horas. Con el objetivo de comparar los datos de concentraciones reales medidas y las estimadas por el modelo se realizó la [figura 8](#) donde se muestra que de manera general los promedios por hora de las concentraciones obtenidas presentan una tendencia a sobreestimar al promedio de las concentraciones reales de PM10.

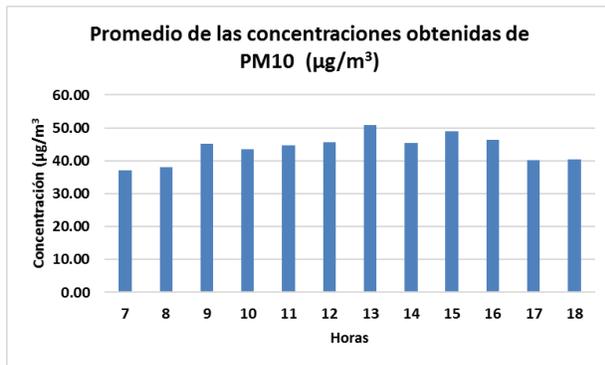


Figura 7. Promedio horario de las concentraciones de PM10 obtenidas

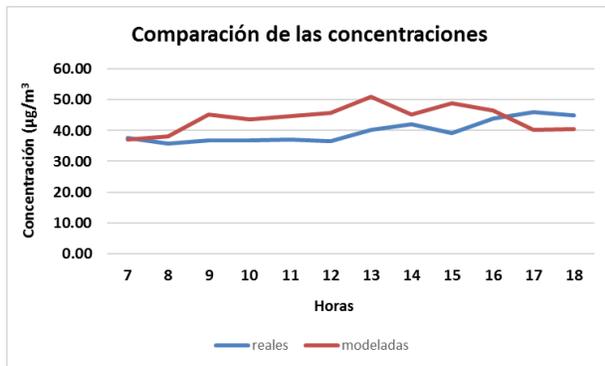


Figura 8. Comparación entre las concentraciones reales y obtenidas

Dicha tendencia no se muestra a las 7:00 y a las 16:00 horas donde coincide el comportamiento de las concentraciones reales y obtenidas. En dichas horas se registraron valores de velocidad del viento bajos lo cual tiene una estrecha relación con el comportamiento de las concentraciones.

Para una mayor seguridad de los datos obtenidos por el modelo se analizaron diferentes estadígrafos.

Análisis de los estadígrafos calculados

La [tabla 4](#) muestra el resultado de los estadígrafos calculados

Tabla 4. Resultado de los estadígrafos calculados

Estadígrafos	Variable	Tolerancia
MAE	Concentración	± 9.51
RMSE	Concentración	± 11.87
BIAS	Concentración	± 1.27

Según el análisis de los estadígrafos (MAE, RMSE, BIAS) se determinó que el modelo de manera general presenta una sutil tendencia a sobreestimar las concentraciones estimadas o sea que hay una ligera diferencia entre el estimador y lo que se estima.

Para ratificar estos resultados se realizó la [figura 9](#) que representa las diferencias de las concentraciones reales y obtenidas, donde se evidencia que dichas concentraciones se encuentran poco distantes entre ellas.

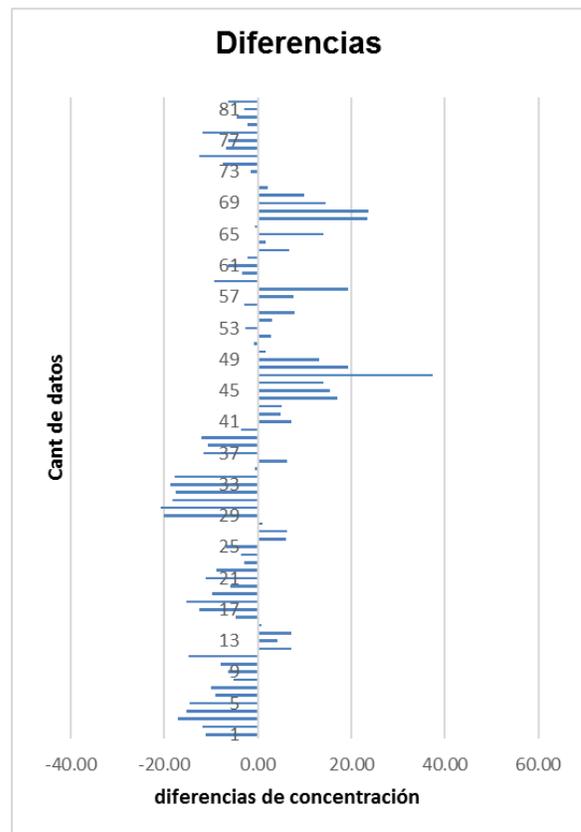


Figura 9. Diferencias de las concentraciones reales y obtenidas

CONCLUSIONES

En el trabajo realizado se estimaron las concentraciones ambientales de PM10 a partir de las emisiones de fuentes móviles, obteniendo que estos tienen una tendencia similar con los datos reales, por lo cual es posible emplear la metodología simplificada propuesta con empleo de un modelo gaussiano para estimar las concentraciones ambientales de PM10 a partir de emisiones de fuentes móviles.

1. En el área de estudio en horario diurno (7:00-18:00 horas) la velocidad del viento oscila entre los 3.45 y 5.46 km/h como promedio. Las concentraciones reales y las obtenidas son muy similares en los horarios donde el viento era mínimo, lo cual demuestra que el modelo no tiene los ajustes necesarios para evaluar adecuadamente la influencia del viento en la dispersión.
2. Los vehículos de mayor emisión son los vehículos pesados que utilizan mayor porcentaje de combustible diésel, dando lugar a una mayor emisión de partículas. Los vehículos de menor emisión son las motos pues estas además de utilizar gasolina presentaron poca frecuencia en el área de estudio en comparación con los restantes tipos de vehículos.
3. Las concentraciones de PM10 obtenidas a partir del modelo gaussiano presentan una sutil tendencia a sobreestimar las concentraciones reales, pero de manera general están en el orden $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

REFERENCIAS

- Belalcazar, L. *et al.* (2010) "Validation of a Computational Fluids Dynamics (CFD) model from a tracer study". *Atmospheric Environment*; Vol. 44, 3814-3822; ISSN: 1352-2310
- 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"
- 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
- IPCC (2007) "Cómo disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir al mínimo el calentamiento global. Guía simplificada del informe del IPCC sobre cambio climático: Mitigación del cambio climático."
- Lipp, D. (2014) El cañón urbano su incidencia en la contaminación del aire. Congreso Internacional de Geografía, (pp. 123-128).
- Madrazo, J. *et al.* (2018) Screening differences between a local inventory and the Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR). *Science of the Total Environment* 631-632 (2018) 934-941.
- Martin *et al.*, (2009) "Determinación de la concentración de dióxido de nitrógeno en la atmósfera de Ciudad de La Habana mediante captadores pasivos". *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 2009, Vol. 40, No. 1.
- Milanes, C. (2013). Inventario de gases de efecto invernadero emitidos por la flota automotor del Depósito Alamar de La Habana y su contribución en la vía convergente de sus líneas. ISPJAE. La Habana, Cuba. Tesis de Maestría.
- Molina, M.; Molina, L. (2004). Megaciudades y contaminación atmosférica. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, EUA. *Journal of the Air & Waste Management Association*.
- Paz, E. *et al.* (2008) Modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por el tráfico vehicular en una vía de Ciudad de La Habana. La Habana. Cuba. Tesis de Maestría. ISPJAE
- Romero, *et al.* (2006) "La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud", Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología. *Rev Cubana Hig Epidemiol* 2006; 44(2).

Schattanek, G. (2008). "Programa para el control de emanaciones de vehículos diésel en equipos de construcción". USA

Vidal, I. (2017). Influencia de condiciones meteorológicas en las emisiones de contaminantes atmosféricos en dos localidades de La Habana. Tesis de Diploma, InSTEC.