

Comportamiento de las fracciones PM₁₀ y PM_{2.5} en tres zonas de La Habana (2012)

BEHAVIOR OF PM₁₀ AND PM_{2.5} FRACTIONS IN THREE AREAS OF HAVANA (2012)

E. MOLINA ESQUIVEL,¹ M. MARTÍNEZ VARONA,¹ E. MENESES RUIZ,² L. M. TURTÓS CARBONELL,² M. GUZMÁN,¹ D. ALONSO,² A. MARTÍNEZ,² I. C. GONZÁLEZ,³ G. PÉREZ⁴

¹ Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología (INHEM) / Ministerio de Salud Pública (MINSAP). Cuba.

² Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (Cubaenergía) / Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). Cuba.

³ Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE) / Ministerio Educación Superior (MES). Cuba.

⁴ Centro de Estudios y Aplicaciones de la Energía Nuclear (CEADEN) / CITMA. Cuba.

Correspondencia: Enrique Molina Esquivel. INHEM. Avenida Infanta # 1158. Centro Habana, La Habana, Cuba. Correo-e: emolina@inhem.sld.cu

RESUMEN

Las partículas en suspensión (PM) constituyen los indicadores de contaminación atmosférica más frecuentemente relacionados con efectos adversos sobre la salud (OMS). *Objetivo:* describir la contaminación por PM₁₀ y PM_{2.5} en tres zonas de La Habana. *Métodos:* mediante el método gravimétrico de bajo volumen se determinaron sistemáticamente las concentraciones medias diarias de PM₁₀ y PM_{2.5} en tres zonas de la ciudad de La Habana: Central, Residencial y Periférica, a lo largo del año 2012. Los resultados se evaluaron estadísticamente. *Resultados:* Las concentraciones de PM_{2.5} no rechazaron la normalidad en ninguna de las zonas, en tanto que para PM₁₀ se rechazó en la zona periférica; las concentraciones medias y máximas de PM₁₀ y PM_{2.5} resultaron significativamente superiores en la zona Central con respecto a las restantes; superiores los días laborables en las tres zonas; las medias mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} solo mostraron un patrón estacional en la zona Residencial, con mayores concentraciones en los meses más cálidos. Las proporciones medias de PM_{2.5}/PM₁₀ en las tres zonas estuvieron entre 53,6 % y 50,6 %. En la zona Central las medias anuales de PM₁₀ y PM_{2.5} superaron las GCA/OMS correspondientes, con altos porcentajes de transgresión de las GCA/OMS para 24 horas, denotando el impacto del transporte sobre la contaminación por PM. En las tres zonas PM₁₀ y PM_{2.5} mostraron altas correlaciones.

Palabras clave: contaminación atmosférica, partículas en suspensión, PM₁₀, PM_{2.5}, calidad del aire.

ABSTRACT

Particulate matter (PM) constitute the atmospheric contamination's indicators more frequently related to adverse effects on health (WHO). *Objective:* To describe the PM₁₀ and PM_{2.5} air pollution in three zones of Havana. *Methods:* By means of low volume gravimetric method, systematically was determined the daily PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations at three zones of Havana city: Central, Residential and Peripheral, through the year 2012. The results were statistically evaluated. *Results:* PM_{2.5} concentrations distributions were normality at the three zones, while for PM₁₀ it was refused in the peripheral area; The means and maximum concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} at the centric zone were significantly superior to the correspondent of the other; At the three zones PM₁₀ and PM_{2.5} showed higher concentrations at working days; The monthly means of PM₁₀ and PM_{2.5} showed bigger concentrations in the warmer

months. The PM_{2.5}/ PM₁₀ means mass proportions were between 53.6 % and 50.6 %. In the Centric zone. Annual means of PM₁₀ and PM_{2.5} surpassed the corresponding ACG/WHO, with high transgression percentages of ACG/WHO for 24 hours, denoting the impact of the transport on the PM air pollution at Centric zone. In the three zones PM₁₀ and PM_{2.5} were significant correlated.

Keywords: Atmospheric pollution, particulate matter, PM₁₀, PM_{2.5}, air quality.

INTRODUCCIÓN

Existe amplia evidencia acerca de la relación entre la exposición a las partículas en suspensión presentes en el aire de zonas urbanas y el riesgo de multitud efectos agudos y crónicos sobre la salud, incluyendo mayor prevalencia y mortalidad por asma y por enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), así como mayor incidencia y mortalidad por cáncer de pulmón.¹ Para ningún otro tipo de contaminantes atmosféricos se han obtenido tantas *funciones concentración-respuesta* para efectos adversos agudos y crónicos, procedentes de estudios independientes con notable consistencia entre los mismos, a niveles de inmisión habituales en poblaciones. Actualmente no se reconoce un nivel de exposición considerado como un umbral de seguridad.^{2,3} En años recientes la Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer de la Organización Mundial de la Salud (IARC/WHO, siglas en inglés), ha clasificado primero a las emisiones de motores de combustible diésel y del transporte en general, y posteriormente a la contaminación atmosférica urbana, como “carcinógenos humanos” (Grupo 1 IARC), atribuyéndosele esta propiedad eminentemente a la composición química de las partículas finas presentes en la misma, emitidas fundamentalmente por los vehículos de transporte, la generación eléctrica y otros procesos industriales basados en la combustión de carbón y derivados del petróleo.^{4,5,6}

Inicialmente y hasta la década de 1970, el monitoreo de las partículas en suspensión (particulate material, siglas PM, en inglés), como generalmente se les conoce, y por ende, la evaluación de la exposición poblacional se realizaba fundamentalmente mediante el método reflectométrico sobre filtros, en función de la opacidad ocasionada por la presencia de *humo negro*, derivado de la combustión incompleta de carbón y residuos de carburantes de origen fósil, procediéndose entonces a la imprecisa conversión de las *unidades de humo u hollín* a unidades de masa por volumen de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), dudosamente comparables entre regiones, países y localidades, debido a la diversidad de fuentes y emisiones específicas, el tipo y la composición de los principales combustibles de cada territorio en estudio, entre otras causas que pueden dar lugar a diferentes tipos de partículas. Posteriormente comenzó a utilizarse mayoritariamente en el monitoreo ambiental el método gravimétrico, que expresa la masa de MP por unidad de volumen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), conjuntamente con otros métodos alternativos como la medición de la atenuación de radiación β y la difracción de rayo láser.^{7,8,9,10}

Debido su mayor peligrosidad, comenzó a cobrar interés la determinación específica de las partículas en suspensión (PM) más finas, tomando como puntos de corte el percentil 50 de su diámetro aerodinámico en micrómetros (μm); tales son los casos de PM₁₀ (también denominadas partículas torácicas), PM_{2.5} (partículas finas o respirables) y PM₁ o (partículas alveolares), sin considerar su composición química.^{1,2,7,11}

En consecuencia, en los últimos años se le ha conferido especial importancia al monitoreo de las fracciones de PM de menor diámetro aerodinámico en el aire urbano, como PM_{2.5}, por su mayor toxicidad para la salud con respecto a las fracciones más gruesas, como PM₁₀, quedando en desuso el empleo del total de partículas en suspensión (PST), como indicador de contaminación, por su menor impacto en la salud, tal como atestiguan numerosos estudios.^{1,3,7,8,9,11}

Deficiencias en el ordenamiento territorial e industrial y de la red vial, ineficiente control de las fuentes industriales y de los vehículos de motor, muchos de estos con deficiente estado técnico, así como el deterioro de la cubierta y paredes de muchas edificaciones, las que la acción del viento pueden ser objeto de erosión y comportarse como fuentes de áreas, entre otros factores, hacen que diferentes distritos urbanos de la ciudad de La Habana se encuentren expuestos a los efectos de la contaminación atmosférica, principalmente por PM.

Estudios, realizados por el Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología (INHEM) y otras instituciones, han señalado a las partículas en suspensión como el principal problema de contaminación atmosférica en la ciudad, demostrándose en diferentes investigaciones significativas asociaciones entre la exposición aguda y crónica a las partículas en suspensión y PM₁₀ y el riesgo de diversos indicadores de morbilidad y mortalidad.^{12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22}

El ineficiente control de emisiones en los procesos de combustión industrial, así como la obsolescencia y el deficiente estado técnico de gran parte de los vehículos de transporte, se han asociado a elevados contenidos de carbono orgánico, inorgánico y total constatados en un sub grupo de muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} colectadas en tres zonas de la ciudad de La Habana evaluadas en el año 2012.²³

MATERIAL Y MÉTODOS

Diseño

Se realizó un estudio descriptivo en paralelo de las concentraciones medias diarias ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM₁₀ y PM_{2.5} a lo largo del año 2012, en tres estaciones de

Figura 1. Ubicación de las estaciones de monitoreo de PM₁₀ y PM_{2.5}. La Habana, 2012.



monitoreo, ubicadas en zonas de la ciudad de La Habana con diferentes características urbanísticas y funcionales que se muestran en la Figura 1; estas fueron:

1. *Residencial*: Ubicada en la sede de la agencia Cubaenergía, municipio Playa, al noroeste de la ciudad, en una zona eminentemente residencial, donde radican algunas instituciones estatales no contaminantes, con escaso flujo vehicular local;

2. *Periférica*: Ubicada en la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), municipio Rancho Boyeros, en la periferia, al suroeste del centro de la ciudad, con bajo flujo vehicular y escaso impacto de industrias locales;

3. *Central*: Ubicada en la sede del INHEM, municipio Centro Habana, al norte y centro de la ciudad, con exposición principalmente a las emisiones del transporte automotor e impacto indirecto de algunas industrias.

Campaña de monitoreo:

A lo largo del año 2012 se realizó el monitoreo en paralelo de las concentraciones (mg/m³) medias diarias (24 horas) de PM₁₀ y PM_{2.5} de forma sincrónica en las estaciones de monitoreo, con un esquema sistemático con inicio aleatorio: cada tres días en las zonas Central y Residencial y cada seis días en la zona Periférica.

Se empleó el método analítico gravimétrico de bajo volumen, a un flujo de 2,3 m³/ hora (38,3 lpm), de acuerdo con los requisitos establecidos por la Agencia Ambiental Europea (EEA, siglas en inglés), con el funcionamiento en paralelo en cada estación de

monitoreo de dos equipos Dependa LVS 3.1, con sendos cabezales de separación inercial con puntos de corte para el 50 % de las partículas con diámetro aerodinámico de 10 μm y 2.5 μm respectivamente (PM₁₀ y PM_{2.5}), colectándose las muestras en ambos casos en filtros de cuarzo o fibra de vidrio de 47 mm de diámetro, y una porosidad de 1 μm.

Previamente y con posterioridad a la toma de las muestras, los filtros fueron acondicionados en una deshumidificadora electrónica durante 48 horas, lográndose una humedad relativa de 40 % (± 5 %) antes de su pesaje en una micro balanza para filtros de la firma Sartorius, modelo ME5-F, en un local del laboratorio de contaminantes del aire del INHEM con humedad y temperatura controladas.

Análisis estadístico

Se crearon bases de datos en Microsoft Access 2013, posteriormente evaluadas mediante el sistema estadístico IBM SPSS Statistics versión 22, que incluyó el análisis comparativo de las distribuciones de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} entre zonas de estudio, la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para una muestra con su nivel de significación (bilateral), indicadores de tendencia central (media aritmética y mediana), dispersión (desviación típica) percentiles 25 y 75 y valores máximo y mínimo, así como las medias por días de la semana y meses del año. Mediante la prueba de la mediana de Wilcoxon para muestras relacionadas, se compararon las determinaciones diarias de PM₁₀ y PM_{2.5} realizadas los mismos días en las tres zonas de estudio. Se calcularon las medias de los porcentajes de la masa de PM_{2.5} con respecto a PM₁₀ en las muestras paralelas de cada zona, los porcentajes de transgresión de las GCA establecidas por la OMS/2005 para determinaciones de 24 horas y se compararon las medias anuales con las referidas GCA/OMS para esos períodos y los coeficientes de correlación de Spearman entre PM₁₀ y PM_{2.5} en cada una de las tres estaciones de monitoreo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Antes de proceder a la presentación de los hallazgos del monitoreo de PM₁₀ y PM_{2.5} en las estaciones de monitoreo ubicadas en las tres zonas de La Habana, en la Tabla 1 se presenta un resumen de

Tabla 1. Algunos parámetros estadísticos de las medias diarias de dióxido de azufre (SO₂) y de nitrógeno (NO₂) determinadas en la estación de monitoreo del INHEM, Centro Habana. Enero – diciembre, 2012.

Contaminante (Método analítico)	Número de determinaciones	Concentraciones (µg/m ³)			
		Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
SO ₂ (Colorimétrico de la thorina)	259	0,2	48.6	7,8	7.86
NO ₂ (Colorimétrico de Griess-Saltzman)	279	3,0	75,0	20.1	9.70

las determinaciones de los dióxidos de azufre (SO₂) y de nitrógeno (NO₂) obtenidas en la estación ubicada en la zona Central (INHEM), única de esa ciudad donde se realizaba el monitoreo continuo de contaminantes atmosféricos durante el año 2012, con la finalidad de ofrecer un perfil más amplio disponible de la contaminación en esa zona.

Las concentraciones de SO₂ resultaron notoriamente bajas, inferiores a las de NO₂, las que reflejaron fundamentalmente, los aportes contaminantes del flujo vehicular moderado, fuente fundamental en esa localidad. Ninguna de las medias anuales de estos gases superó las GCA de la OMS¹ específicas ni las denominadas *concentraciones máximas admisibles* (CMA) establecidas para las medias anuales de esos

contaminantes en la Norma Cubana actualmente vigente (NC 1020: 2014)¹⁰.

La Tabla 2 presenta un grupo de los descriptores de las concentraciones diarias de PM₁₀ y PM_{2.5} en las tres zonas. Las mayores concentraciones, tanto de PM₁₀ como de PM_{2.5} se registraron en la estación ubicada en el INHEM, en una zona próxima al centro de la ciudad, con predominio de actividades comerciales,

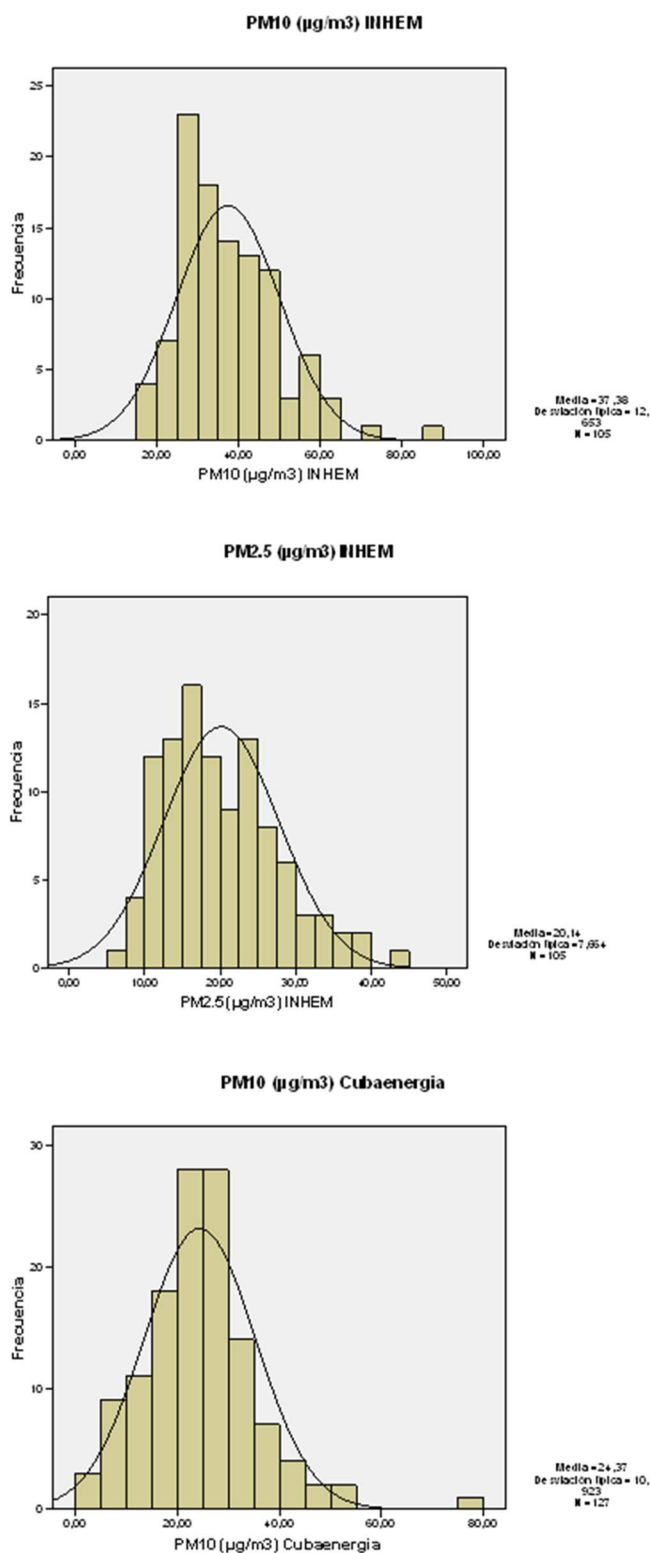
en la que predominó el transporte automotor como principal tipo de fuente emisora de contaminantes del aire, unido al impacto indirecto de fuentes industriales, ubicadas a distancia, a barlovento (noreste - este - sureste) de esa localización, según los rumbos predominantes de los vientos, de acuerdo con la rosa de vientos promedio anual reportada por la estación meteorológica más próxima, ubicada a unos 6 Km al nordeste, próxima a la margen este del canal de entrada de la bahía de La Habana y a la costa (Figura 1).

De acuerdo con la probabilidad asociada a la prueba de comparación de la mediana de Wilcoxon para muestras relacionadas, las distribuciones de las determinaciones diarias sincrónicas tanto de PM₁₀ como de PM_{2.5} obtenidas en la estación Central

Tabla 2. Descriptores de las concentraciones medias diarias (µg/m³) de PM₁₀ y PM_{2.5} y probab. para Kolmogorov-Smirnov de normalidad. Estaciones de monitoreo INHEM, Cubaenergía y CUJAE. La Habana; enero – dic. / 2012.

Parámetros estadísticos		Estaciones de monitoreo					
		INHEM (Central)		Cubaenergía (Residencial)		CUJAE (Periférica)	
		PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Número de muestras		105	105	127	127	54	54
Media aritmética		37,4	20,1	24,4	12,2	24,9	12,9
Desviación típica		12,6	7,67	10,92	5,93	10,33	6,06
Máximos		89,8	43,6	77,6	33,3	68,2	41,2
Percentiles	25	28,3	14,5	17,8	8,2	19,8	9,2
	50	35,2	18,5	23,7	11,4	24,5	11,5
	75	44,9	24,8	29,7	15,8	28,1	14,5
Significación (p) asintótica para Kolmogorov-Smirnov		0.208	0.311	0.425	0.498	0.037	0.099

Figura 2. Histogramas de las concentraciones medias diarias de PM₁₀ y PM_{2.5} en las estaciones de monitoreo INHEM, Cubaenergía y CUJAE. La Habana, enero – diciembre de 2012.



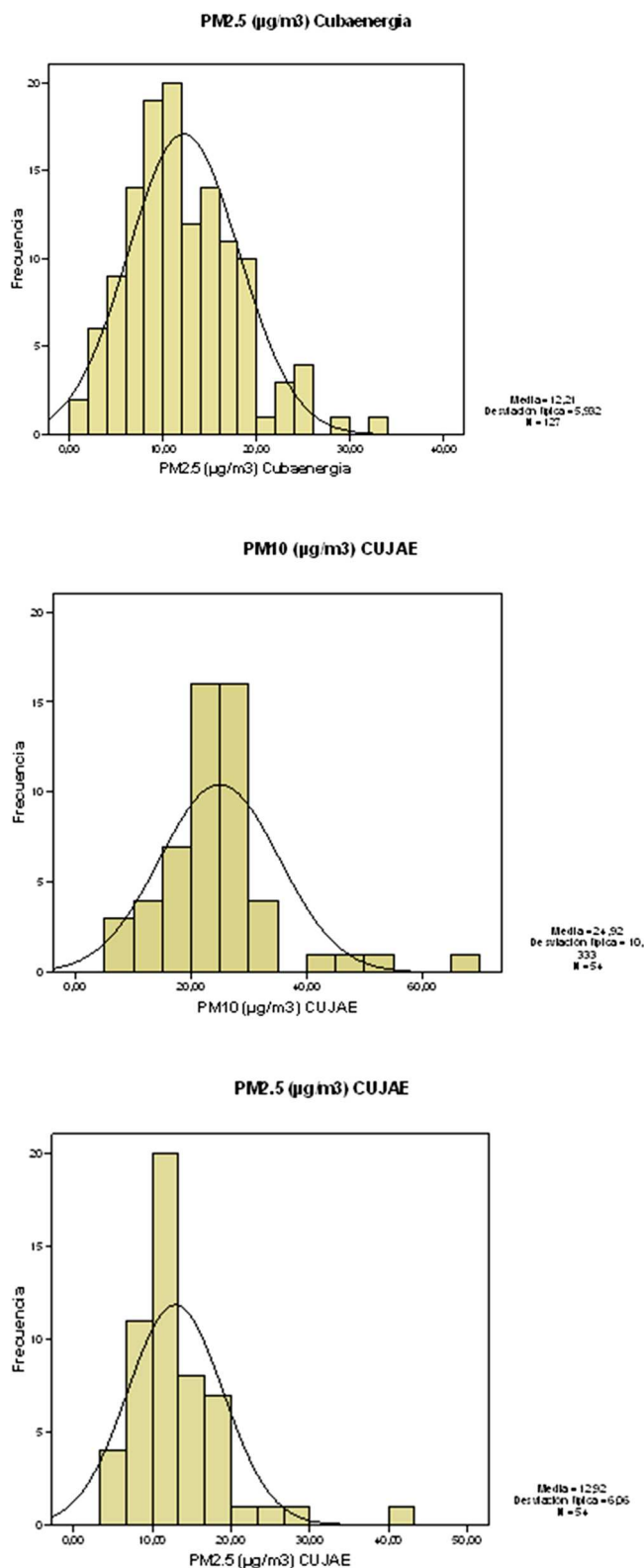
(INHEM) resultaron significativamente superiores a las observadas en la zona Residencial (Cubaenergía) y la Periférica (CUJAE), con idénticos valores de $p = 0.000$ para la hipótesis nula en los cuatro casos; en tanto que entre las dos últimas zonas no se hallaron diferencias significativas entre las distribuciones de PM₁₀ ($p = 0.773$) ni de PM_{2.5} ($p = 0.269$), de modo que de acuerdo con este criterio, no existieron diferencias entre los niveles de inmisión por PM₁₀ ni PM_{2.5} entre esas zonas.

Independientemente de que el criterio estadístico le otorgó a la zona Central (estación de monitoreo INHEM) niveles de contaminación por PM₁₀ y PM_{2.5} contrastadamente superiores a las restantes zonas de estudio, se trata de promedios anuales que alcanzaron solo valores de inmisión moderados, similares o incluso inferiores a los reportados en grandes ciudades de países desarrollados, en las que a pesar de mostrar en los últimos años tendencias a la reducción de la contaminación por PM₁₀ y PM_{2.5}, como resultado de programas de control de emisiones y otras medidas integradas, aún se reportan concentraciones que representan importantes riesgos para la salud.²⁴

A pesar del moderado escenario de exposición por PM₁₀ y más aún por PM_{2.5} en esta zona de la ciudad, caracterizada por alta densidad demográfica (unas 94000 personas residían en el territorio circundante a 1 km de radio en ese período) la aplicación de un grupo de *funciones concentración-respuesta* para PM_{2.5} obtenidos en grandes estudios epidemiológicos con los requisitos metodológicos necesarios, realizados en diversas ciudades de Estados Unidos y de Europa que comparten perfiles epidemiológicos comparables a los que ostenta la población cubana, y especialmente de La Habana, tales como tasas de mortalidad infantil, expectativa de vida, principales causas de mortalidad y morbilidad (enfermedades crónicas no transmisibles), darían como resultado estimaciones cuantitativas de riesgos poblacionales de magnitud considerable, debido precisamente al elevado número y proporción de población expuesta a numerosos efectos adversos de amplia severidad, principalmente crónicos, a pesar de que de que, de forma paradójica, los incrementos de los riesgos relativos individuales correspondientes a cada efecto adverso específico resulten bajos (cerca de la unidad).^{2,3,4,5,7,8,11,13,15,16,17,19,20,21,22}

Lo anteriormente expresado se corroboró con los resultados de una estimación cuantitativa de riesgos asociados a las

Figura 2 (continuación). Histogramas de las concentraciones medias diarias de PM₁₀ y PM_{2.5} en las estaciones de monitoreo INHEM, Cubaenergía y CUJAE. La Habana, enero – diciembre de 2012.



concentraciones de PM_{2.5} en el período 2012-2014 no publicado aún ¹², con el empleo de FCRs procedentes de estudios extranjeros realizados en numerosas ciudades de Estados Unidos de América (principalmente) ² y de Europa ³ con indicadores socio-demográficos y epidemiológicos relativamente similares a los de Cuba y especialmente La Habana, tales como: tasa de mortalidad infantil, esperanza de vida al nacer global y por sexos, estructura poblacional por grupos de edades, principales causas de muerte y de morbilidad, con predominio de enfermedades crónicas no transmisibles. ^{25,26,27}

Aunque la zona del centro presentó mayor exposición, y por ende, mayores riesgos sanitarios potenciales, en ninguna de las zonas de estudio se logró el cumplimiento de las GCA OMS para promedios anuales (20 µg/m³ y 10 µg/m³ para PM₁₀ y PM_{2.5}; se debe señalar que estos niveles de inmisión crónica no se consideran niveles seguros totalmente (exentos de incrementos riesgos) para la salud a la luz de evidencias epidemiológicas recientes, principalmente para subgrupos de población de mayor susceptibilidad, tal como se reconoce por la propia OMS en su informe del año 2005. ^{1,2,3,4,5,11,13,15}

Respecto a la distribución de las concentraciones diarias, a tenor de la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Tabla 2), solo se rechazó la normalidad para PM₁₀ en la estación CUJAE, a pesar de que todas las series presentaron algún grado de asimetría con desviación hacia la derecha, tal como muestran los histogramas correspondientes a ambas fracciones de partículas en las tres estaciones de monitoreo (Figura 3), ocasionado por la ocurrencia infrecuente de valores que superan notoriamente se apartan de los registros habituales, vinculados potencialmente a variables meteorológicas desfavorables a la dispersión o que favorecen la influencia de importantes fuentes emisoras sobre un punto específico, así como posibles modificaciones no permanentes de emisiones por fuentes locales, entre los principales determinantes posibles; este comportamiento asimétrico resulta característico de las series de medias diarias de las fracciones de PM y otros contaminantes comunes en el aire urbano, las que en la mayoría de los casos se aproxima a una distribución log-normal, tal como antológicamente ha sido reportado. ²⁸

En la Tabla 3 se exponen las medias y extremos de ambas fracciones de partículas en cada estación de monitoreo, unidos a los correspondientes a los porcentajes que la fracción fina (PM_{2.5}) constituyó de la masa total de PM₁₀ en cada estación de monitoreo.

Tabla 3. Algunos parámetros estadísticos de las concentraciones diarias ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM₁₀ y PM_{2.5}. Estaciones de monitoreo INHEM, Cubaenergía y CUJAE. La Habana; enero – diciembre 2012.

<i>Estaciones de monitoreo</i>	<i>Fracciones de partículas</i>		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Media</i>
INHEM (Central)	PM ₁₀	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15,75	89,82	37,38
	PM _{2.5}		6,08	43,60	20,14
	PM _{2.5} / PM ₁₀ (%)		25,84	70,40	53,59
Cubaenergía (Residencial)	PM ₁₀	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,15	77,65	24,37
	PM _{2.5}		1,05	33,33	12,21
	PM _{2.5} / PM ₁₀ (%)		13,82	84,44	50,60
CUJAE (Periférica)	PM ₁₀	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	7,28	68,17	24,92
	PM _{2.5}		3,88	41,25	12,92
	PM _{2.5} / PM ₁₀ (%)		34,01	73,07	52,00

Tabla 4. Porcentajes de trasgresión de las GCA / OMS 2005. Medias diarias de PM₁₀ y PM_{2.5}. Estaciones de monitoreo INHEM, Cubaenergía y CUJAE. La Habana; enero – diciembre 2012.

<i>Fracción de partículas</i>	<i>Porcentajes de trasgresión de las GCA por estación</i>			<i>GCA OMS para medias de 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>
	<i>INHEM</i>	<i>Cubaenergía</i>	<i>CUJAE</i>	
PM ₁₀	13,3	2,4	3,7	50 (percentil 99)
PM _{2.5}	23,8	3,1	3,7	25 (percentil 99)

Nuevamente se resalta la significativa diferencia entre la magnitud de las concentraciones registradas en la estación del centro (INHEM) con respecto a las restantes, ya discutido con amplitud. Asimismo se aprecia que la fracción PM_{2.5} constituyó una proporción ligeramente mayor en la zona céntrica de la ciudad, donde el aporte fundamental de contaminantes está dado por el transporte automotor, con respecto a las otras dos zonas de estudio, en las que el impacto de este tipo de fuentes resultó menor; estos resultados son consistentes con el hecho reconocido de que los motores de los vehículos de transporte constituyen los principales emisores de contaminantes atmosféricos en zonas urbanas y en especial de partículas finas en la gran mayoría de los centros urbanos del mundo.^{4,6, 7,11, 24,29}. En el caso de La Habana, aunque el flujo vehicular no alcanza la magnitud que en otras capitales de países en desarrollo, la flota vehicular se caracteriza por la obsolescencia, deficiente estado técnico de una importante proporción de estos medios de transporte, los que por lo general no cuentan con dispositivos para el control de partículas,^{7,19,20,21,22}; estas condicionantes

fundamentaron el hallazgo de elevadas concentraciones de carbono elemental (CE) y orgánico (CO_r) en las fracciones PM_{2.5} y PM₁₀ determinadas en un grupo de las muestras colectadas en estas mismas zonas de La Habana y período de estudio, en las que además, la zona central (expuesta al transporte) mostró proporciones superiores de CE y CO_r en PM_{2.5} y PM₁₀ con respecto a las otras dos zonas de estudio.²³

Se destacó el hecho de que en las tres estaciones de monitoreo las razones medias resultantes de las concentraciones de PM_{2.5} con respecto las determinaciones de PM₁₀ (PM_{2.5} / PM₁₀) determinadas de forma sincrónica, resultaron inferiores a 0,6 (esto es, inferiores al 60 %), con un promedio no ponderado de 52,06 % en las tres estaciones; esta baja relación entre ambas fracciones de PM es consecuente con el ineficiente o nulo control de las emisiones de partículas en las fuentes, tal como ocurre en muchos países en desarrollo, en tanto que en la mayoría de las zonas urbanas de los países desarrollados, en los que existe un efectivo control de emisiones de partículas en las fuentes estacionarias y móviles, reduce principalmente aquellas de mayor diámetro PM₁₀, el

Figura 3. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM₁₀ por días de la semana. Estaciones Central (INHEM), Residencial (Cubaenergía) y Periférica (CUJAE). La Habana; enero – diciembre / 2012.

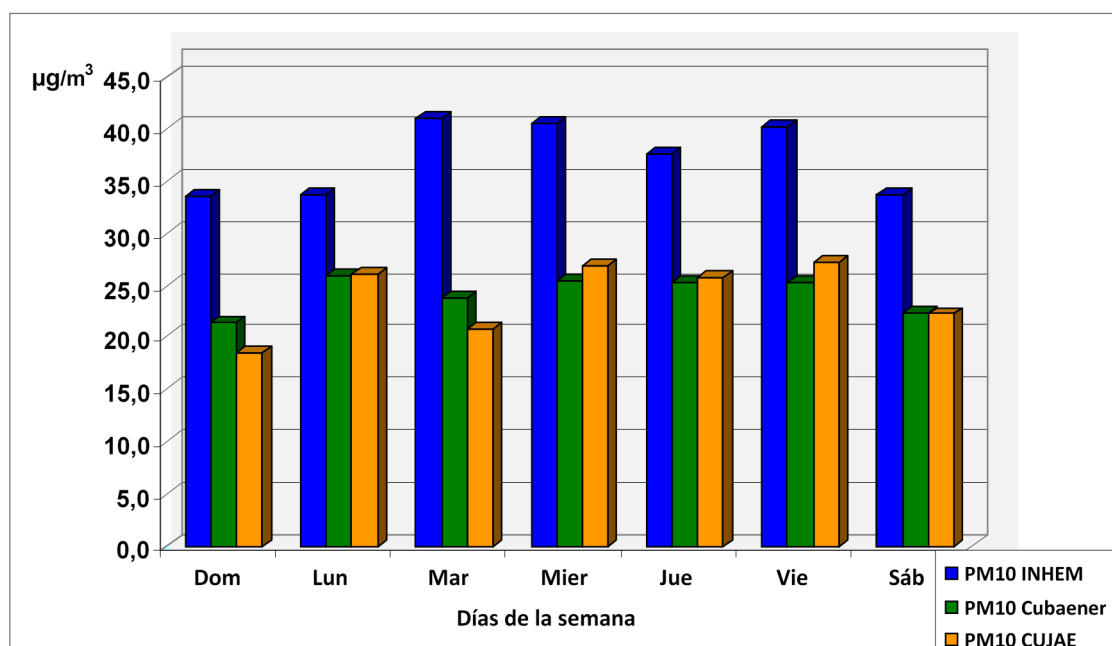
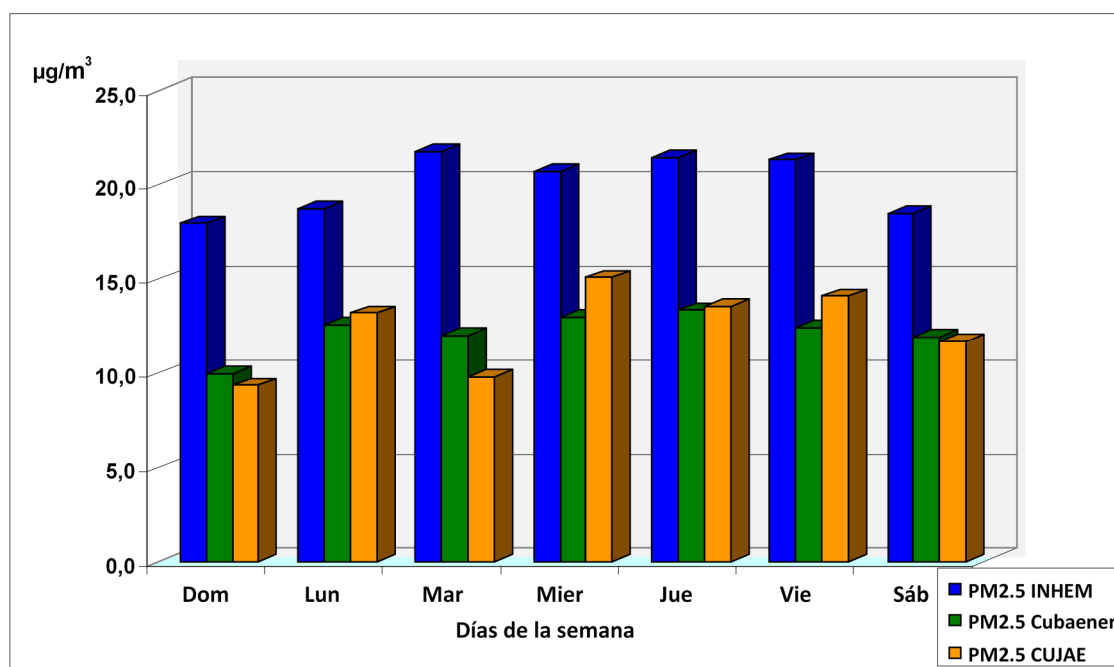


Figura 4. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{2.5} por días de la semana. Estaciones Central (INHEM), Residencial (Cubaenergía) y Periférica (CUJAE). La Habana; enero – diciembre / 2012.



porcentaje de PM_{2.5} / PM₁₀ por lo regular supera el 60 – 70 %. Si se comparan los valores medios anuales de PM₁₀ y PM_{2.5} en la estación de monitoreo INHEM, ubicada cercana al centro comercial, y la única que realiza el monitoreo continuo de contaminantes atmosféricos en esta ciudad, con las medias anuales de

los dióxidos de nitrógeno y de azufre registrados en el propio año 2012, muy inferiores a los de PM₁₀, se observa un perfil de contaminación similar a los descritos en las zonas suburbanas de países en desarrollo o subdesarrollados, en los que al aporte fundamental de la contaminación por partículas en

Figura 5. Medias mensuales de las concentraciones diarias ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM₁₀. Estaciones Central (INHEM), Residencial (Cubaenergía) y Periférica (CUJAE). La Habana; enero - diciembre / 2012.

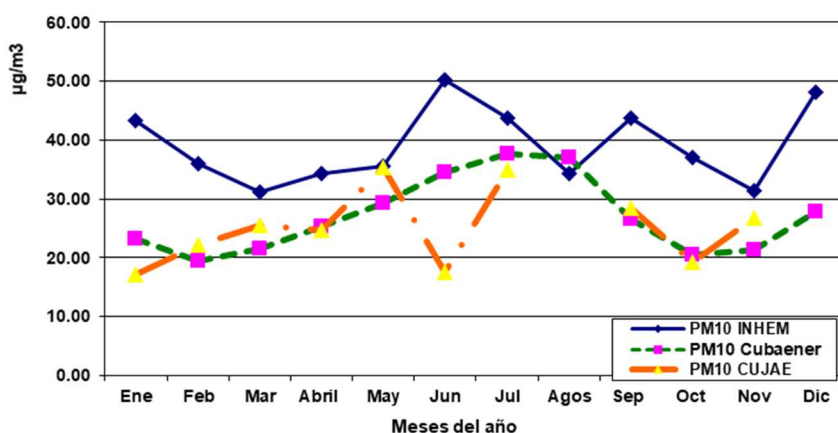
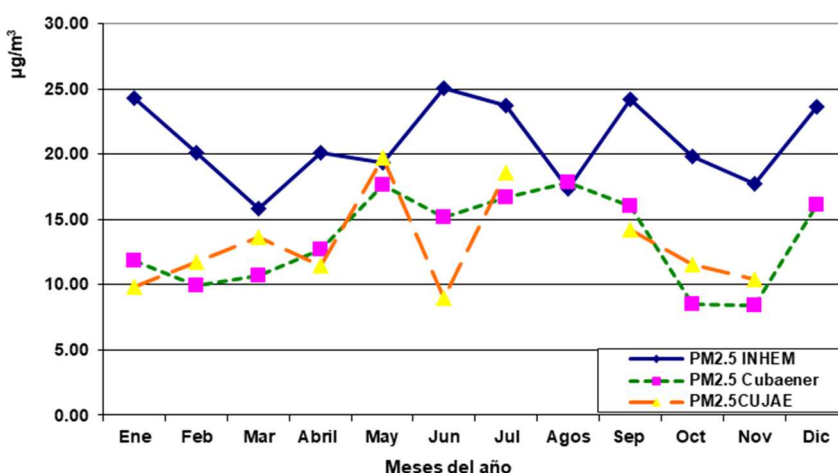


Figura 6. Medias mensuales de concentraciones diarias de PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Estaciones Central (INHEM), Residencial (Cubaenergía) y Periférica (CUJAE). La Habana; enero - diciembre de 2012.



suspensión originadas por parte del transporte, y de algunas fuentes estacionarias ubicadas a distancia, en las márgenes de la bahía de La Habana (Figura 1) probablemente se añada el impacto de fuentes de área, dados por la erosión de las superficies de edificaciones con deficiente estado de conservación y la re suspensión de partículas del suelo, bien sea de las propias avenidas o espacios descubiertos carentes de vegetación, todo lo cual explicaría la disparidad entre los niveles de inmisión por los gases SO₂ y NO₂, originados en procesos de combustión y por PM₁₀ y PM_{2.5} en la zona próxima al centro de la ciudad. 2,3,7,8,12,13,19,24,31

La Tabla 4 muestra los porcentajes de trasgresión de las guías de calidad del aire de la OMS para ambas fracciones de partículas y su comparación con los límites establecidos en las GCA / OMS para las medias diarias, los que solo pueden ser transgredidos en 1 %

de las determinaciones. Tal como cabía esperar, la situación de la estación de monitoreo INHEM, del centro de la ciudad, es más desfavorable con respecto a las otras dos zonas, con un cumplimiento de la GCA/OMS diaria para PM₁₀ solo el percentil 87 de las ocasiones, y peor aún para PM_{2.5}, para el que solo se alcanzó el cumplimiento de la GCA correspondiente en el 76 % de las determinaciones, en tanto que según se establece, en ambos casos ello debe ser cumplimentado en el 99 % de las determinaciones.¹

Si se toman como referencia las *concentraciones máximas admisibles (CMA)* vigentes en el país a partir del año 2014, establecidas para PM₁₀ y PM_{2.5} en la norma cubana NC1020: 2014,¹⁰ en la zona central se violaron para ambas fracciones de PM tanto las medias anuales correspondientes, al igual que se excedieron las frecuencias de transgresión de las CMA establecidas para promedios de 24 horas, en tanto que en las restantes zonas, solo por estrecho margen se cumplieron las medias anuales, aunque se superaron en más del 2% de las determinaciones medias diarias. El Anexo 1 expone las CMA establecidas en dicha norma para los gases y fracciones de PM según períodos

de tiempo evaluados en el presente estudio.

Las concentraciones de PM₁₀ a lo largo de los días de la semana en las tres estaciones de monitoreo (Figura 3) mostraron una tendencia poco contrastada a la disminución en los días no laborables, lo que pudiera explicarse por la reducción de las emisiones de las fuentes locales en esos días, compensada en alguna medida por la re suspensión por la acción del viento de partículas gruesas depositadas en el suelo.

En el caso de PM_{2.5} (Figura 4) se observó un patrón similar al de las partículas gruesas, aunque con una reducción de las concentraciones en los días no laborables menos contrastada aún, especialmente en la zona del centro (INHEM), lo que pudiera explicarse por el mayor tiempo de persistencia de las partículas finas y en el caso del centro de la ciudad (INHEM), por una reducción poco marcada de las emisiones de

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Spearman entre concentraciones sincrónicas de PM₁₀ y PM_{2.5}. Estaciones INHEM, Cubaenergía y CUJAE. La Habana, enero – diciembre de 2012.

Rho de Spearman	Estaciones de monitoreo		
	INHEM	Cubaenergía	CUJAE
Coefficiente de correlación	0,894	0,890	0,812
Significación (bilateral)	0,000	0,000	0,000

la principal fuente emisora de esa zona, en este caso el transporte automotor, caracterizada precisamente por el predominio de partículas finas y ultrafinas.^{4,6,7,29,30,32}

Las Figuras 5 y 6 muestran el comportamiento de las concentraciones medias mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5}, respectivamente, en las tres estaciones de monitoreo. De acuerdo con los resultados, tan solo en la estación de monitoreo ubicada en la zona Residencial (Cubaenergía) las series de PM₁₀ y PM_{2.5} mostraron un comportamiento estacional, dado por mayores concentraciones en los meses más cálidos y lluviosos, con la excepción del mes de diciembre para PM_{2.5}. Las restantes estaciones mostraron comportamientos irregulares mes a mes.

Puesto que la fracción PM_{2.5} está incluida en PM₁₀, pudiera pensarse que la correlación más adecuada entre ambas debía hacerse entre la fracción fina (PM_{2.5}) y la gruesa de PM₁₀ (2.5-10), evitando comparar “el todo con una parte”, realizadas por equipos que permitan esa separación; sin embargo puesto que este estudio se consideran dos determinaciones en paralelo, realizadas por dos equipos de monitoreo independientes, dotados diferentes dispositivos de separación específicos para PM_{2.5} y PM₁₀ respectivamente, en cada estación de monitoreo, se consideró procedente realizar en este análisis, mediante el cálculo del coeficiente de correlación, no paramétrica Rho de Spearman. La Tabla 5 muestra los resultados de estas correlaciones, las que, a pesar de resultar altamente significativas en las tres zonas de estudio, no alcanzaron valores tan cercanos a la unidad como pudiera esperarse a priori, alcanzando los valores máximos en las estaciones ubicadas en el centro y en la zona residencial, expuestas aparentemente a un tipo y aporte diario más estable de fuentes locales, en tanto que la zona periférica pudiera estar algo más sujeta a la variabilidad de la influencia de fuentes con distintas características en cuanto al tamaño principal de las partículas, debido precisamente a la ubicación de esa estación de monitoreo (Figura 1).

CONCLUSIONES

Aunque al comparar el escenario de exposición a PM₁₀ y PM_{2.5} con las GCA/OMS y las CMA vigentes

en la norma nacional, solo alcanzaron notoriedad las concentraciones registradas en la zona central de la ciudad, vinculadas potencialmente a mayores riesgos sanitarios, principalmente crónicos, debe señalarse que en las restantes zonas tampoco mostraron niveles exentos de riesgos.

Tanto el perfil de la contaminación por gases y partículas, disponible solo para la zona central, como las razones PM_{2.5} / PM₁₀ registradas en las tres zonas pusieron en evidencia el ineficiente o inexistente control de material particulado, lo que resultó más preocupante en la zona del centro, debido precisamente a la peligrosidad inherente a la composición química de las partículas emitidas por los vehículos de transporte, más aún en las condiciones descritas.

Los resultados y argumentos expuestos fundamentan la necesidad de actualizar a nivel nacional los inventarios territoriales de fuentes estacionarias y de sus emisiones contaminantes del aire, con especial atención de material particulado, así como incrementar el rigor en la evaluación sistemática de las emisiones de los vehículos de transporte con motores de combustión, todo ello incluido en un programa integrado de carácter intersectorial, dirigido a mejorar el control y la reducción efectiva de los aportes contaminantes de cada fuente, con el empleo eficiente de la mejor tecnología objetivamente disponible; unido a lo anterior se deberán incrementar paulatinamente las capacidades de monitoreo de PM y otros contaminantes prioritarios del aire, identificados a partir de los inventarios de emisiones de cada localidad y región, que permitan estimar los posibles riesgos sanitarios asociados y corroborar la efectividad de las acciones de prevención y control ejecutadas para el mejoramiento de la calidad del aire, con prioridad en la ciudad de La Habana y las principales zonas urbanas e industrializadas del país.

De igual forma, continuar ejecutando las medidas de planeación territorial, urbana e industrial establecidas legalmente en el país, así como optimizar el análisis de los procesos inversionistas con posible impacto en la calidad del aire.

BIBLIOGRAFÍA

1. World Health Organization. Air quality guidelines global update 2005. Copenhagen: WHO; 2006 (ISBN 92 890 2192 6).
2. U.S. Environmental Protection Agency. BenMAP. Environmental Benefits Mapping and Analysis Program – Community Edition. User’s Manual Appendices, April 2017. US EPA: Research Triangle Park, NC; 2017. Disponible en: <http://www2.epa.gov/benmap/benmap-community-edition> (Revisado 25 septiembre / 2017).
3. World Health Organization - Regional Office for Europe. Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit

- analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Copenhagen, Denmark: WHO; 2013.
- International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks. Vol. 109. Outdoor air pollution and cancer. Lyon, France: IARC; 2015.
 - Raaschou-Nielsen O, Andersen ZJ, Beelen B, Samoli E, Stafoggia M, Weinmayr G, et al. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European study of cohorts for Air pollution effects (ESCAPE). *Lancet Oncol* 2013; 14: 813–22.
 - HEI Diesel Epidemiology Panel. Diesel Emissions and Lung Cancer: An Evaluation of Recent Epidemiological Evidence for Quantitative Risk Assessment. Boston, MA: Health Effects Institute Special Report 19, Nov. 2015.
 - WHO Regional Office for Europe. Health effects of black carbon. Copenhagen: WHO; 2012 (ISBN: 978 92 890 0265 3).
 - WHO Regional Office for Europe. Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease. Geneva: WHO; 2016.
 - United States Environmental Protection Agency. List of Designated Reference and Equivalent Methods. National Exposure Research Laboratory. Human Exposure & Atmospheric Sciences Division. Research Triangle Park, NC 27711. December 18, 2015
 - Oficina Nacional de Normalización. Norma cubana 1020: 2014. Calidad del aire — Contaminantes — Concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables. La Habana: NC; 2014.
 - Pope III CA, Dockery DW. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association* 2006. 56:709–742 (ISSN 1047-3289).
 - Molina E, Martínez M, Suárez R, Meneses E, Turtós LM, Guzmán M, et al. Estimación del impacto epidemiológico de la contaminación atmosférica por PM_{2.5} en Centro Habana – Cerro; 2013 - 2014. Conferencia En: Memorias VI Taller Nacional Contaminación atmosférica vs. desarrollo sostenible. Agencia Cubaenergía / CITMA. La Habana, sept. 2015.
 - Turtós Carbonell LM, Meneses Ruiz E y Molina Esquivel E, et al. Modelación de la contaminación atmosférica y valoración de impactos epidemiológicos y externalidades asociadas a instalaciones energéticas e industriales. *Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. Vol.4, No.2, Año 2014 (Premios Academia de Ciencias de Cuba 2013).
 - Molina E. Funciones exposición respuesta para estudios nacionales de impacto ambiental de los contaminantes del aire en salud. En: Memorias III Taller Nacional Contaminación atmosférica vs. desarrollo sostenible. Agencia Cubaenergía – AENTA/CITMA. La Habana; Septiembre de 2008.
 - Molina E, Martínez M, Romero M. Determinantes ambientales de enfermedades respiratorias crónicas en niños y adultos de la ciudad de La Habana. En: Memorias VIII Congreso Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y VI Congreso Nacional Asociación Cubana de Ingeniería Ambiental Sanitaria y Ambiental. La Habana, Mayo 2007.
 - Meneses E, Molina E. Contaminantes del aire y mortalidad aguda en Ciudad de La Habana. *Boletín INFOHEM*. 2007. 5(4): 1-14 (ISSN 1991-0193).
 - Molina E, Meneses E. Análisis de estudios epidemiológicos nacionales para la obtención de funciones exposición respuesta. *Revista Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*. 2003, julio; (3-4): Ponencias. IX Taller de la Cátedra de Medio Ambiente. Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Nucleares/CITMA. La Habana, 2003. (ISBN 959-7136-20-1).
 - Molina E, Meneses E. Evaluación epidemiológica del impacto de los contaminantes del aire. Propuesta metodológica. *Rev Cubana Hig Epidemiol*. 2003; 41(2-3) Versión on-line ISSN 1561-3003. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032003000200002&lng=es&nrm=iso&tlng=es (revisado 31 octubre 2017).
 - Molina E et al. Crisis de asma y enfermedades respiratorias agudas; contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en Centro Habana. *Rev Cubana Medicina General Integral*. 2001; 17(1):10-20.
 - Pita G, Molina E. Asociaciones entre concentraciones de inmunoglobulinas en niños, factores ambientales de riesgo y morbilidad respiratoria. *Rev Cubana Hig Epidemiol* 2001; 39(2): 9-14.
 - Molina E, Barceló C, Bonito LA, del Puerto C. Factores de riesgo de cáncer pulmonar en Ciudad de La Habana, 1987 – 1988. *Rev Cubana Hig Epidemiol*. 1996; 34(2) Versión on-line ISSN 1561-3003. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30031996000200002&lng=es&nrm=iso&tlng=es. (revisado 31 / octubre 2017).
 - Molina E, Milanés A, Pita G, Monterrey P. Asociación entre la contaminación atmosférica y otros factores ambientales con la morbilidad respiratoria y la función pulmonar en niños. En: Memorias XXIII Congreso Interamericano Ingeniería Sanitaria y Ambiental. La Habana: AIDIS; nov. 1992. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/arquitectura/top5/top5.htm> (Revisado 12 febrero 2017).
 - Molina E, Martínez M, Meneses E, Turtós C, et al. Carbono elemental y orgánico en PM_{2.5} y PM₁₀ de zonas urbanas de La Habana (Cuba). *Rev. Higiene y Sanidad Ambiental*. 2015 (3): 1343-49 (ISSN 1579-1734).

24. European Environment Agency. Air quality in Europe — 2017 report. Copenhagen: EEA; 2017 (ISBN 978-92-9213-921-6) (ISSN 1977-8449).
25. Dirección de Registros Médicos y Estadísticas de Salud /Ministerio de Salud Pública de Cuba. Anuario Estadístico de Salud 2013. La Habana: MINSAP; 2014.
26. Dirección de Registros Médicos y Estadísticas de Salud /Ministerio de Salud Pública de Cuba. Anuario Estadístico de Salud 2014. La Habana: MINSAP; 2015.
27. World Health Organization. Guidelines on studies in environmental epidemiology. Environmental Health Criteria 27. Geneva: WHO; 1983.
28. Álvarez L, Salazar A. Síntomas respiratorios y función pulmonar en niños de 6 a 14 años de edad y su relación con la contaminación por material particulado PM₁₀ en Santa Marta - Colombia. *Rev Esp Salud Pública* 2013; 87: 239-246.
29. Harley R. Trends and sources of particulate matter emissions from gasoline and diesel engines. In: Health Effects Institute. Workshop on fuel composition and PM. Chicago, December 2016: HEI; 2017. Disponible en: https://www.healtheffects.org/sites/default/files/Harley-Trends_and_Sources_of_PM_Emissions.pdf (Rev.7 nov. 2017).
30. Bell ML. Assessment of the Health Impacts of Particulate Matter Characteristics. Health Effects Institute Research Report 161. Boston: HEI; 2012. Disponible en: <http://www.healtheffects.org>
31. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade do ar no estado de São Paulo 2015. São Paulo: CETESB, 2016 (en idioma portugués el original).
32. Health Effects Institute. The Advanced Collaborative Emissions Study (ACES). Executive Summary. Boston, MA: HEI; December; 2015. Disponible en: <https://www.healtheffects.org/>

Anexo 1

Concentraciones máximas admisibles (CMA) establecidas en la norma cubana NC 1020: 2014 ¹⁰ (contaminantes seleccionados), períodos de 24 horas y medias anuales.

Contaminante	Período de tiempo	CMA (µg/m ³)
Dióxido de azufre	24 horas	45 (percentil 98)
	Media anual	40
Dióxido de nitrógeno	24 horas	40 (percent. 98)
	Media anual	35
PM _{2.5}	24 horas	25 (percentil 99)
	Media anual	15
PM ₁₀	24 horas	50 (percentil 99)
	Media anual	30