

Higiene y Sanidad Ambiental, **15** (3): 1343-1349 (2015)

Carbono elemental y orgánico en PM_{2.5} y PM₁₀ de zonas urbanas de La Habana (Cuba)

ELEMENTAL AND ORGANIC CARBON IN PM_{2.5} AND PM₁₀ AT URBAN ZONES OF HAVANA (CUBA)

Enrique MOLINA ESQUIVEL¹, Miriam MARTÍNEZ VARONA², Leonor M. TURTÓS CARBONELL³, Elieza MENESES RUIZ³, Saul GARCÍA DOS SANTOS-ALVES⁴, Luís F. CUESTA ZEDEÑO⁵, Saturnino PIRE RIVAS⁵

¹ Departamento de Evaluación de Riesgos; Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología; Ministerio de Salud Pública de Cuba. Infanta # 1158. Municipio Centro Habana. La Habana, Cuba. Correo-e: emolina@inhem.sld.cu

² Departamento de Química Sanitaria; Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología; Ministerio de Salud Pública de Cuba.

³ División de Evaluación de Impacto Ambiental; Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía; Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba.

⁴ Departamento de Contaminantes del Aire; Centro Nacional de Sanidad Ambiental; Instituto de Salud Carlos III. Madrid, España.

⁵ Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría; Ministerio de Educación Superior de Cuba.

RESUMEN

Entre los contaminantes atmosféricos, las partículas en suspensión (PM) poseen el mayor nivel de evidencia de efectos adversos agudos y crónicos sobre la salud, incluyendo cáncer pulmonar. Actualmente se revaloriza la importancia del contenido de carbono en PM como trazadores de compuestos orgánicos de alta peligrosidad. Mediante el método termo-óptico se determinaron las concentraciones de carbono elemental (CE), orgánico (CO_r) y total (CT) en 12 muestras diarias sincrónicas de PM₁₀ y PM_{2.5} obtenidas en tres zonas de la ciudad de La Habana, entre enero y febrero de 2012. Se calcularon las concentraciones medias de PM_{2.5} y PM₁₀ y sus contenidos de CE, CO_r y CT en cada zona y los porcentajes de éstos con respecto a la masa de PM₁₀ y PM_{2.5}. En las tres zonas el CE predominó en PM_{2.5} y el CO_r en PM₁₀, con concentraciones de CT del orden de las reportadas en zonas urbanas altamente contaminadas de Europa y Estados Unidos. Las masas de CE, CO_r y CT constituyeron elevados porcentajes de ambas fracciones de PM, superiores en PM_{2.5}, mostrando altos coeficientes de correlación. Estos hallazgos hacen evidente la importante contribución del transporte en la generación de PM_{2.5} y PM₁₀ y sus altos contenidos en compuestos de carbono.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, partículas en suspensión, PM_{2.5}, PM₁₀, carbono elemental y orgánico.

ABSTRACT

Among the criteria atmospheric contaminants, particulate matter (PM) have the largest level of evidence about acute and chronic adverse effects on health, including lung cancer. The importance of the content of carbon elements in PM like tracers of dangerous organic compounds at present is revalued. By means of thermal-optical method was determined concentrations of elemental (EC), organic (CO_r) and total carbon (CT) in 12 daily synchronic samples of PM₁₀ and PM_{2.5} obtained in three zones of the city of Havana, at January - February 2012. Was calculated the daily mean concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ and their EC, CO_r and CT contents and the

percentages of these regarding the PM₁₀ and PM_{2,5} mass. In the three zones the EC predominated in PM_{2,5} and Cor in PM₁₀, with concentrations of CT similar as reported at heavily contaminated urban areas of other countries. The masses of EC, Cor and CT constituted high percentages of both fractions of PM, superiors in PM_{2,5}, showing high correlation coefficients. These findings put in evidence the important contribution of the transport in the generation of PM_{2,5} and PM₁₀ and its high contents of carbon's compounds.

Keywords: Atmospheric pollution, suspended particulate matter, PM_{2,5}, PM₁₀, elemental and organic carbon.

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 afecciones cardiovasculares, cerebro-vasculares, asma y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), así como mayor incidencia y mortalidad por cáncer de pulmón.^{1,2,3,4}

En el año 2012 la Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer / Organización Mundial de la Salud (IARC / WHO, siglas en inglés) catalogó a las emisiones de motores diesel y del transporte en general como “*Carcinógenos en humanos*” (Grupo 1 IARC); posteriormente en el 2013 también incluyó en este grupo a la contaminación atmosférica urbana, atribuyéndosele esta propiedad fundamentalmente a las partículas y compuestos orgánicos emitidos por los vehículos de transporte y los procesos de combustión industrial de carbón y derivados del petróleo.^{5,6}

Inicialmente y hasta la década de 1970, el monitoreo de las partículas en suspensión (particulate material (siglas PM, en inglés, como principalmente se les conoce); por ende, la evaluación de la exposición poblacional se realizaba eminentemente mediante el empleo de métodos ópticos como el reflectométrico, basados en la medición de la absorción o transmisión de la luz en función de la opacidad ocasionada por la presencia de *humo negro* (u hollín), derivado de la combustión incompleta de hidrocarburos de origen fósil (sólidos y líquidos), biomasa y otros residuos de compuestos de carbono, procediéndose posteriormente a la conversión de las unidades ópticas resultantes (“*unidades de humo o carbono negro equivalente*”) a unidades de masa por volumen de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) mediante un factor de conversión dudosamente extrapolable a otras regiones, países y localidades, debido a la diversidad de fuentes antrópicas o naturales, procesos tecnológicos (no solo de combustión) y emisiones específicas, tipo y composición de los principales combustibles utilizados en cada territorio, entre otras causas que pueden dar lugar a diferentes tipos de partículas (no solo negras ni compuestas por carbono), con posibles sesgos en la conversión a unidades de masa, más aún al comparar las concentraciones de diversas zonas.⁷

En consecuencia, con posterioridad 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 o la difracción de rayo láser.⁷

Paralelamente, debido su mayor peligrosidad, comenzó a cobrar interés la determinación de las partículas en suspensión (PM) más finas de determinado diámetro aerodinámico (\emptyset) en micras (μm); tales son los casos de PM₁₀, también denominadas partículas torácicas; PM_{2,5}, denominadas como partículas finas o respirables; PM₁, también denominadas partículas alveolares y PM_{0,1}, denominadas partículas ultrafinas).⁸

Debido a que a pesar de los posibles sesgos descritos los estudios epidemiológicos han demostrado *funciones concentración-respuesta* tan o más fuertes y consistentes entre las determinaciones de PM medidas en función del *humo negro* u opacidad aparente, con respecto a las evaluadas mediante la masa de las fracciones de PM por unidad de volumen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sin considerar la composición química, en los últimos años internacionalmente ha cobrado gran interés la determinación del contenido de carbono (orgánico, inorgánico y total) en las fracciones PM₁₀ y PM_{2,5}, realizadas mediante métodos basados en el principio termo-óptico, como representativa del contenido de diversos compuestos resultantes de la combustión incompleta de hidrocarburos, a los cuales se les atribuyen las principales propiedades nocivas de estas fracciones de MP, incluyendo la carcinogenicidad.^{7,9,10,11,12,13} De acuerdo con reportes de la última década relativos a las concentraciones de contaminantes del aire en la ciudad de La Habana,^{14,15,16,17,18,19} las partículas en suspensión constituyen el tipo de contaminación del aire predominante, tal como ocurre en los países en desarrollo.^{3,4,8,20,21}

El ineficiente o inexistente control de emisiones en los procesos de combustión industrial, y principalmente, la obsolescencia y el deficiente estado técnico de gran parte de los vehículos de transporte, exentos de la adecuada evaluación y eficaz control técnico de sus emisiones hacen postular que las partículas PM₁₀ y PM_{2,5} presentes en el aire de la ciudad de La Habana poseen altos contenidos de carbono orgánico (CO_r) y elemental (CE).

MATERIAL Y MÉTODOS

A lo largo del año 2012 se realizó el monitoreo sistemático (cada cinco días) de 24 horas de PM₁₀ y PM_{2.5} de forma paralela, mediante equipos de muestreo de la firma Derenda (modelo LVS 3.1), con los separadores inerciales correspondientes a los percentiles 50 de las fracciones PM₁₀ y PM_{2.5}, respectivamente, a un flujo de 38,3 LPM, realizándose la determinación gravimétrica de PM₁₀ y PM_{2.5} de bajo volumen, sobre filtros de fibra de cuarzo de 47 mm de diámetro y porosidad equivalente de 1 µm, en tres estaciones de monitoreo, ubicadas en zonas de la ciudad de La Habana con diferentes actividades funcionales principales: 1) *céntrica* (expuesta al transporte), en la sede del Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología (INHEM), en el municipio Centro Habana; 2) *residencial*, en la sede de la agencia Cubaenergía, en el municipio Playa; y 3) *periférica* (con influencia industrial), en la Ciudad Universitaria José Antonio Echeverría (CUJAE), en el municipio Rancho Boyeros, respectivamente.

Luego de realizadas las determinaciones gravimétricas de PM₁₀ y de PM_{2.5} en el laboratorio de contaminantes del aire en el INHEM, de forma aleatoria fueron seleccionadas cuatro muestras sincrónicas de cada una de las tres zonas (total 12 muestras), colectadas entre los meses de enero y febrero de ese año.

El total de 24 muestras fueron enviadas al laboratorio de análisis de contaminantes del aire del Centro Nacional de Sanidad Ambiental del Instituto de Salud Carlos III de Madrid, España para la determinación de carbono elemental (CE), carbono

orgánico (CO_r), y carbono total (CT) mediante el método termo-óptico. El número de muestras estuvo limitado por el cumplimiento de los requisitos de calidad de las muestras seleccionadas y las posibilidades operacionales para el traslado de las mismas al laboratorio donde fue evaluado el contenido de carbono mediante el método termo-óptico, al no contar con esa posibilidad analítica en el laboratorio del INHEM.

Análisis estadístico

Aunque el análisis de cuatro muestras de cada zona de estudio pueden ser insuficientes para caracterizar la contaminación en el período bimestral estudiado, permiten una valoración preliminar del comportamiento de estos componentes en las fracciones de PM evaluadas, de importante valor como primera experiencia nacional de determinaciones de CO_r, CE y CT en muestras de aire en zonas urbanas. Para cada estación de monitoreo, y posteriormente para el total de muestras fueron determinadas las concentraciones mínimas, medias y máximas de PM_{2.5} y PM₁₀; contenido de CE, CO_r y CT en ambas fracciones de partículas, así como los porcentajes de CE, CO_r y CT correspondientes a la masa total de PM₁₀ y PM_{2.5}.

Mediante la prueba de Kruskal-Wallis se realizó la comparación de las distribuciones de cada variable entre las zonas de estudio; atendiendo al escaso número de observaciones en cada área, se consideró el valor de $p < 0.1$ para el rechazo de la hipótesis nula. Fueron calculados los coeficientes de correlación de Spearman (ρ) entre las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} y sus contenidos de CE, CO_r y CT. La evaluación estadística se realizó mediante el sistema estadístico SPSS versión 20 sobre Windows.

Figura 1. Estaciones de monitoreo (La Habana, 2012): 1) Cubaenergía (Municipio Playa); 2) CUJAE (Municipio R. Boyeros); 3) INHEM (Municipio Centro Habana).



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A pesar de que en el año 2012 las concentraciones medias, tanto de PM₁₀ como de PM_{2.5} resultaron superiores en la zona céntrica expuesta al transporte con respecto a la residencial y la periférica con influencia industrial, no ocurrió así en las muestras seleccionadas para este estudio, donde las concentraciones medias de PM₁₀ y de PM_{2.5} resultaron muy similares, tal como se constata en la Tabla 1, en ello pudo influir la mayor inclusión de días no laborables en la zona céntrica con respecto a las restantes; Sin embargo tanto en PM_{2.5} como PM₁₀ las concentraciones absolutas de CE, CO_r y CT resultaron superiores en la zona céntrica. Al intentar corroborar lo

Tabla 1. Estadísticas descriptivas. Concentraciones de carbono orgánico, elemental y total ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PM_{2.5} y PM₁₀. Estaciones monitoreo de las zonas céntrica, residencial y periférica de La Habana. Enero – febrero 2012.

Masa total y de carbono según fracción de partículas		Concentración media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) por estación de monitoreo			
		Céntrica	Residencial	Periférica	
PM _{2.5}	Masa total	16,8	14,5	15,1	
	Carbono	elemental	6,0	4,6	3,0
		orgánico	3,8	2,5	2,1
		total	9,8	7,2	5,1
Número de muestras		4	4	4	
PM ₁₀	Masa total	29,3	27,0	29,2	
	Carbono	elemental	5,2	2,8	2,5
		orgánico	7,9	5,3	3,4
		total	13,1	8,1	5,9
Número de muestras		4	4	4	

Tabla 2. Contraste de distribuciones de variables entre estaciones de monitoreo. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes. Zonas céntrica, residencial y periférica de La Habana. Enero – febrero 2012.

Variable objeto de contraste entre zonas		Significación	
Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5}	0.808	
	Contenido en PM _{2.5}	Carbono elemental	0.097
		Carbono orgánico	0.167
		Carbono total	0.093
	PM ₁₀	0.778	
	Contenido en	Carbono elemental	0.166
		Carbono orgánico	0.046
Carbono total		0.110	

anterior mediante inferencia estadística por vía no paramétrica con la prueba de Kruskal-Wallis, solo las concentraciones de CO_r en PM₁₀ alcanzaron diferencias significativas entre zonas ($p > 0.5$) (Tabla 2); considerando el escaso número de observaciones en cada serie se tomó el valor $p < 0.1$ como punto de rechazo de la hipótesis nula, con lo cual la misma también se rechazó para las distribuciones del contenido de CE y de CT en PM_{2.5} entre zonas, dadas

por mayores concentraciones en la zona céntrica. Estas mayores concentraciones de CE, CO_r y CT en dicha zona se explican plenamente por la mayor incidencia del transporte como la principal fuente de partículas. Los hallazgos expuestos concuerdan con los reportes de diversos estudios extranjeros.^{7,9,11,12,13}

En la propia Tabla 1 se constató que en las tres zonas, PM_{2.5} incluyó con mucho la mayor parte de la masa de CT presente en PM₁₀, las que constituyeron el 74,8 %, 88,9 % y 86,4 % en las zonas céntrica, residencial y periférica, respectivamente. Asimismo en las tres zonas se constató el predominio de CE en PM_{2.5} y de CO_r en PM₁₀, resultados que también concuerdan con el conocimiento ampliamente extendido a nivel mundial de que las partículas generadas en los procesos de combustión industrial y más aún por el transporte automotor son predominantemente finas (PM_{2.5}, PM₁ y PM_{0.1}).^{4,5,7,12,13}

Precisamente, la mayor nocividad, incluyendo carcinogenicidad de las partículas emitidas por el transporte se le atribuye tanto por su composición química como por su mayor capacidad de penetración hasta las zonas más distales y vulnerables del aparato respiratorio.^{1,3,6,8,9,20,21,22}

Las concentraciones de CE y CT en PM_{2.5} resultaron del orden de las cifras reportadas en zonas urbanas de Europa y Estados Unidos expuestas a concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} aún más elevadas, lo que denota el alto potencial contaminante de las fuentes de combustión.^{9,11,12,13,21}

Otro hallazgo interesante, muy vinculado al análisis anterior estuvo dado por el valor de la masa que PM_{2.5} representó de PM₁₀, mostrando el mayor

Tabla 3. Algunos parámetros de las concentraciones de carbono elemental, orgánico y total en PM₁₀ y PM_{2,5}, y porcentajes de la masa de cada fracción de partículas en las tres estaciones de monitoreo. La Habana, enero – febrero 2012.

Fracción de partículas y tipo de carbono		Número muestras	Concentraciones medias (µg/m ³)	% de la masa de esa fracción de partículas	
PM _{2,5}	Masa total	12	15,27	100	
	Carbono		elemental	4,45	29,1
			orgánico	3,10	20,3
			total	7,55	49,4
PM ₁₀	Masa total	12	28,97	100	
	Carbono		elemental	3,29	11,4
			orgánico	5,33	18,4
			total	8,62	29,8

Tabla 4. Coeficientes de correlación (Rho) de Spearman y significación bilateral (p) entre las concentraciones (µg/m³) de PM_{2,5} y su contenido en carbono elemental, orgánico y elemental. La Habana, enero – febrero 2012.

PM _{2,5}	Carbono		
	elemental	orgánico	total
Rho	0,764	0,543	0,732
Signific. (p) bilateral	0,004	0,068	0,007
Número muestras	12	12	12

Tabla 5. Coeficientes de correlación Rho de Spearman y significación bilateral (sig.) entre las concentraciones (µg/m³) de PM₁₀ y su contenido en carbono elemental, orgánico y elemental. La Habana, enero – febrero 2012.

PM ₁₀	Carbono		
	elemental	orgánico	total
Coef. correlación Rho	0,389	0,524	0,490
Significación (p) bilateral	0,212	0,080	0,106
Número muestras	12	12	12

por ciento la zona céntrica (57,3 %), con respecto a las zonas residencial (53,7 %) y periférica con influencia industrial (51,7 %); en todos los casos representó una fracción inferior al 65 %, propio de países en desarrollo con escaso o nulo control de las emisiones de partículas en las fuentes.^{2,4,8,18,19,20,21,22}

Una vez evaluado el comportamiento de las fracciones de masa de PM_{2,5} y PM₁₀ y sus contenidos en CE, CO_r y CE por separado en cada estación de monitoreo, y comprobado el comportamiento relativamente homogéneo de los hallazgos descritos, se procedió al análisis conjunto del total de muestras, cuyos resultados se exponen en la Tabla 3. De este modo la masa media de PM_{2,5} constituyó el 52,7 % de la masa promedio de de PM₁₀.

Con respecto a las concertaciones medias de CE y CT contenidas en PM_{2,5}, las mismas representaron fracciones de la masa total muy superiores a los correspondientes al contenido de esos elementos en PM₁₀; no ocurriendo así con el CO_r, el que representó un porcentaje relativamente similar en PM_{2,5} y PM₁₀. Los altos porcentajes de CE, CO_r y CT, principalmente en PM_{2,5} y aún en PM₁₀ se interpretan como resultantes del ineficaz control de emisiones de partículas en los procesos de combustión de fuentes estacionarias y del transporte; las severas implicaciones sanitarias de la presencia de altos contenidos de carbono en ambas fracciones de PM ya han sido referidas.^{1,3,7,8,20,21}

La correlación entre las determinaciones paralelas de las concentraciones diarias de las fracciones PM₁₀ y PM_{2,5} de las tres zonas de estudio en su conjunto resultó fuerte y significativa, con un coeficiente Rho

de Spearman = 0.851 (p bilateral <0.001), no ocurriendo así con el contenido de carbono.

La Tabla 4 mostró la alta y significativa correlación existente entre las concentraciones de PM_{2.5} y el contenido de CE y CT; ello nuevamente demuestra que el origen principal de las partículas finas estuvo dado por las emisiones del transporte automotor y otros procesos de combustión en fuentes estacionarias, con el consiguiente impacto en la composición química y toxicidad de esta fracción de partículas y sus posibles implicaciones sanitarias ya expresadas.

Estos resultados coinciden con estudios europeos que reportan fuertes correlaciones entre las masas de CE y PM_{2.5}, así como de humo negro (medido en unidades ópticas), considerando que todos constituyen indicadores de los procesos de combustión incompleta de los vehículos de transporte automotor, principalmente por vehículos pesados y motores diesel.^{7,8,13}

Con respecto a PM₁₀ en la Tabla 5 también se puso de manifiesto el impacto de las fuentes de combustión en su origen, aunque menor con respecto a PM_{2.5}, a pesar de lo cual se denota la importante presencia de CO_r en la composición de las mismas, poniendo de relieve, nuevamente su origen en procesos de combustión altamente incompletos e ineficientes, en primer lugar del transporte pesado con motores diesel, y de fuentes estacionarias.

Se destaca el hecho de que la composición de CE, CO_r y CT en PM_{2.5} y PM₁₀ tuvo un comportamiento relativamente similar en las tres estaciones de monitoreo y no solo en Centro Habana, la más impactada por el transporte, aunque con un flujo vehicular muy inferior al descrito en estudios de otros países,^{7,8,11,13} lo que pudiera explicarse por la ineficiencia generalizada de todos los procesos de combustión, en la que pudieran incidir numerosos factores tecnológicos, así como el alto grado de impurezas de los combustibles y por ende la elevada ineficiencia y alto potencial contaminante de los vehículos, sin que contemos con datos concretos que permitan avalar o refutar esta hipótesis.

CONCLUSIONES

1. En las tres zonas de estudio tanto las concentraciones y porcentajes de la masa de carbono constituyente de PM_{2.5}, y en menor medida de PM₁₀, pusieron de manifiesto la importante contribución de las emisiones del transporte y otros procesos de combustión en la generación de ambas fracciones de partículas, lo que les confiere elevada toxicidad.
2. Las concentraciones de PM_{2.5} concentraron la gran mayoría del carbono elemental y total, en tanto que PM₁₀ mostró mayor contenido de carbono orgánico y menor proporción de carbono total.

3. Las concentraciones de carbono elemental, orgánico y total en PM_{2.5} y PM₁₀ resultaron del orden de las cifras reportadas en zonas urbanas de Europa y Estados Unidos expuestas a altos flujos vehiculares o grandes industrias, con concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ notoriamente superiores a las registradas en estas zonas de La Habana.

BIBLIOGRAFÍA

1. Porto D, Hoet PH, Verschaeve L, Schoeters G, Nemery B. Genotoxic effects of carbon black particles, diesel exhaust particles, and urban air particulates and their extracts on a human alveolar epithelial cell line (A549) and a human monocytic cell line (THP-1). *Environ Mol Mutagen.* 2001; 37(2):155-63.
2. World Health Organization. Air quality guidelines. Global Update 2005. Copenhagen: WHO; 2006 (ISBN 92 890 2192 6).
3. Raaschou-Nielsen O, Andersen ZJ, Beelen R, 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). *The Lancet Oncol.* 2013 August (14): 813-22.
4. Pope III CA, Burnett RT, Turner MC, Cohen A, Krewski D, Jerrett M, Gapstur SM, Thun MJ. Lung Cancer and Cardiovascular Disease Mortality Associated with Ambient Air Pollution and Cigarette Smoke: Shape of the Exposure-Response Relationships. *Environmental Health Perspectives.* 2011. November; 119(11): 1616-1621.
5. Agencia Internacional de investigaciones sobre el cáncer / OMS. Nota de prensa N° 213; 12 de junio de 2012: Gases de escape de los motores diesel son carcinógenos. Disponible en: <http://www.iarc.fr>
6. International Agency for Research on Cancer / WHO. Press release No. 221. 17 October 2013. Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Disponible en: <http://www.iarc.fr>
7. World Health Organization Regional Office for Europe. Health effects of black carbon. Copenhagen: WHO; 2012.
8. 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>
9. Kwangsam N, Cocker DR. Organic and elemental carbon concentrations in fine particulate matter in residences, schoolrooms, and outdoor air in Mira Loma, California. *Atmospheric Environment.* 2005; (39): 3325-33.
10. Cheng Wu, Wai Man, Jingxiang H, Dui W, Jian Z. Determination of Elemental and Organic

- Carbon in PM_{2.5} in the Pearl River Delta Region: Inter-Instrument (Sunset vs. DRI Model 2001 Thermal/Optical Carbon Analyzer) and Inter-Protocol Comparisons (IMPROVE vs. ACE-Asia Protocol) Disponible en: <http://www.tandfonline.com/loi/uast20>
11. Yttri KE, Aas W, Bjerke A, Cape JN, Cavalli F, et al. Elemental and organic carbon in PM₁₀: a one year measurement campaign within the European Monitoring and Evaluation Programme EMEP. *Atmos Chem Phys.* 2007; (7): 5711–5725.
 12. Saarikoski S, Timonen H, Saarnio K, Aurela M, Järvi L, et al. Sources of organic carbon in fine particulate matter in northern European urban air. *Atmos. Chem. Phys.* 2008; (8): 6281–6295. Netherlands Environmental Assessment Agency. Traffic emissions of elemental carbon (EC) and organic carbon (OC) and their contribution to PM_{2.5} and PM₁₀ urban background concentrations. Bilthoven: NEAA; 2012.
 13. Molina E, Martínez M, Turtós L, Meneses E, Pérez G, Piñera I. Comportamiento de las fracciones PM₁₀ y PM_{2.5} en tres zonas de La Habana, año 2012. En: Memorias del V Taller Contaminación atmosférica VS Desarrollo sostenible. AENTA/ CITMA, La Habana, sept. 2013 (CD-ROM).
 14. Molina E, Pérez G, Martínez M, Piñera I, Guibert R, Aldape F, Flores J. Comportamiento de las fracciones fina y gruesa de PM₁₀ en la estación de monitoreo de calidad del aire en Centro Habana. Campaña 2006 - 2007. *Higiene y Sanidad Ambiental.* 2011; (11): 820-826.
 15. Martínez M, Molina E, Fernández A. Comportamiento de contaminantes atmosféricos en una zona central de la ciudad de La Habana en el periodo 2005-2009. *Higiene y Sanidad Ambiental.* 2010;10): 645-649.
 16. 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. La Habana, mayo 2005 (CD ROM) (ISBN 978-959-7158-684).
 17. Meneses E, Molina E, Suárez R. Contaminantes del aire y mortalidad aguda en Ciudad de La Habana. En: Memorias VIII Congreso Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria. La Habana, mayo 2005 (CD ROM) (ISBN 978-959-7158-684).
 18. E. Molina, L. A. Brown, V. Prieto, M. Bonet y L. Cuellar. Atenciones hospitalarias por crisis de asma y enfermedades respiratorias agudas, contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en Centro Habana. *Rev Cubana Med Gen Integr.* 2001;17(1):10-20.
 19. World Health Organization Regional Office for Europe. Human Health in Areas with Industrial Contamination. Copenhagen: WHO; 2014.
 20. European Environment Agency. Air quality in Europe - 2014 report. Copenhagen: EEA; 2014.
 21. Grahame TJ, Schlesinger RB. Cardiovascular health and particulate vehicular emissions: a critical evaluation of the evidence. *Air Quality, Atmosphere and Health* 2010 (1):3–27