Dispersión y Concentración de Aerosoles Marinos PM₁₀ en una Ciudad Costera del Caribe

Alejandra M. Vengoechea, Roberto E. Rojano* y Heli A. Arregoces

Grupo de Investigación GISA, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira, Km 5, Vía a Maicao, Riohacha-Colombia (Email: rrojano@uniguajira.edu.co; avengoechea@uniguajira.edu.co; harregoces@uniguajira.edu.co)

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia:

Recibido Feb. 20, 2018; Aceptado May. 3, 2018; Versión final May. 28, 2018, Publicado Dic. 2018

Resumen

En este estudio, las concentraciones de aerosoles marinos estimadas con el modelo CALPUFF (modelo de dispersión multi-capas, multi-especies, en estado no estacionario) se compararon con las concentraciones de PM₁₀ monitoreadas cerca a la costa con equipo gravimétrico de bajo volumen. Se encontró que la contribución de los aerosoles marinos a la masa de PM₁₀ puede ser significativa, alcanzando entre el 20% y 27%. Concentraciones entre 5 y 15 µg/m³ fueron estimadas en calles que están a menos de 100 metros de la playa. Las concentraciones máximas se encontraron en el punto de muestreo ubicado mar adentro. La correlación fue fuerte y positiva en este mismo punto ($r^2 = 0,65$). En el análisis de dispersión, el impacto de los aerosoles marinos se observó a más de 20 km de la playa en dirección del viento, con niveles entre 1,65 µg/m³ y 15,02 µg/m³. En el monitoreo con los equipos gravimétricos, se obtuvo una concentración máxima de PM₁₀ de 77,98 µg/m³ y una concentración mínima de 2,82 µg/m³. Los resultados demuestran que CALPUFF proporciona predicciones razonablemente precisas de los patrones de deposición de contaminantes marinos a largo plazo

Palabras clave: modelado; aerosoles marinos; PM₁₀, dispersión; CALPUFF

Dispersion and Concentration of PM₁₀ Particles in a Caribbean Coastal City

Abstract

In this study, the concentrations of marine aerosols estimated with the model CALPUFF (a multi-layer, multi-species, non-steady-state puff dispersion) were compared with the concentrations of PM₁₀ monitored near the coast with minimum volume gravimetric equipment. It was found that the contribution of marine aerosols to the mass of PM₁₀ can be significant, reaching between 20% and 27%. Concentrations between 5 and 15 µg/m³ were estimated on streets that are less than 100 meters from the beach. The maximum concentrations were found at the sampling point located offshore. The correlation was strong and positive at this same point ($r^2 = 0.65$). In the dispersion analysis, the impact of marine aerosols was observed more than 20 km from the beach in the direction of the wind, with levels between 1.65 µg/m³ and 15.02 µg/m³. In the monitoring with the gravimetric equipment, a maximum concentration of PM₁₀ of 77.98 µg/m³ and a minimum concentration of 2.82 µg/m³ was obtained. The results show that CALPUFF provides reasonable predictions of long-term marine pollutant deposition patterns.

Keywords: modeling; marine aerosols; PM₁₀; dispersion; CALPUFF

INTRODUCCIÓN

El material particulado (MP), quien Lippmann (Lippmann, 2008) llamó aerosol atmosférico (AA), puede ser emitido, dependiendo de su proceso de formación, desde diferentes fuentes. Su tamaño varía desde 0,1 a 100 μm permitiendo su dispersión a grandes distancias o sedimentar inmediatamente. Los estudios relativos al material particulado (MP) suspendido en el aire, coinciden en poner de manifiesto intervalos de tamaños que se le deben hacer seguimientos sistemáticos para conocer sus niveles y composición en poblaciones urbanas. La Organización Mundial de la Salud (OMS), establece guías de calidad de aire para el MP, PM₁₀ y PM_{2.5} (OMS, 2005). El intervalo de tamaño PM₁₀ son partículas sólidas o líquidas con diámetro aerodinámico menor de 10 μm capaces de alojarse en el sistema respiratorio, compuesta principalmente por polvo mineral y aerosoles marinos (AM) (EEA, 2014). Inicialmente se tenía el concepto de que la composición de los AA dependía únicamente de su fuente y las condiciones geológicas del suelo. Sin embargo, actualmente se ha evidenciado que la composición de los AA varía durante el proceso de levantamiento, transporte y deposición de la partícula, influyendo en los compartimentos atmosféricos, pedológicos, marinos y organismos vivos (Scheuvers et al., 2013).

Una fuente de emisión de aerosoles es el mar, denominados comúnmente aerosoles marinos (AM). Los AM forman parte de la totalidad de los AA, compuestos por dos tipos de aerosol: uno formado por la incidencia de los vientos sobre la superficie del océano, compuesto principalmente por sal marina (Scerri, et al, 2016) e iones inorgánicos (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) y otro tipo de aerosol compuesto por material orgánico (carbohidratos, lípidos, microorganismos, virus marinos, algas) y compuesto de sulfato de sal no marina que pueden ser transportados a las costas por la acción de los vientos (Lang-Yona et al., 2014). Los AM impactan la calidad del aire, pueden representar 80% del total de las concentraciones anuales de los aerosoles en zonas costeras. En ciudades pobladas las concentraciones varían de 0.3 a 13 mg/m^3 , con un intervalo de dispersión hasta de 25 km de la costa, este aerosol puede presentar reacciones químicas atmosféricas originando aerosoles secundarios especialmente en áreas contaminadas (Scerri et al., 2016). Investigaciones científicas han concluido que parte de esta fracción biológica de aerosoles marinos y algunos microorganismo marinos y algas como las cianobacterias y los desechos de plancton producen daños en tejidos, esta fracción biológica puede ser aerosolizada y transportada a la costa por los vientos e influir en la salud humana por la inflamación y las reacciones alérgicas cuando se inhala (Lang-Yona et al., 2014). En zonas costeras pueden afectar la salud de las personas y los ecosistemas (Gantt et al., 2015). El MP afecta la calidad de aire, la salud, el clima, los materiales, las estructuras y ocasiona impacto en la visibilidad. Por lo tanto, el conocimiento de la concentración y dispersión del material particulado PM₁₀ proveniente de los océanos es necesario para cuantificar su contribución a la calidad del aire en las ciudades costeras.

En general, el MP atmosférico es una preocupación, debido a sus efectos perjudiciales para la salud pública (Kim et al., 2015; Leiva et al., 2013), su influencia en el clima local y su impacto ecológico (Buseck et al., 2000; Fan, 2013). Se ha determinado que el aumento de las concentraciones de aerosoles y polvos en algunas ciudades está asociado a mortalidad, morbilidad (Scerri et al., 2016). Estudios epidemiológicos recientes demuestran que existe una correlación entre mortalidad cardiovascular, mortalidad respiratoria, ingresos a urgencias hospitalarias, problemas dermatológicos y conjuntivitis (Khaniabadi et al., 2017; Scerri et al., 2016; Zhou et al., 2016). El aumento de la mortalidad cardíaca y respiratoria especialmente en personas mayores, está relacionado con el aumento del PM₁₀ y PM_{2.5} (fracción gruesa) (Tobías et al., 2011) y a la presencia de material biológico transportado con el polvo (Perez et al., 2008).

Estudios de la calidad del aire en la ciudad costera de Riohacha, ubicada en el Caribe colombiano, han concluido que existe un aporte significativo a la masa de PM₁₀ de AM (Argumedo y Castillo, 2016; Rojano et al., 2014). Sin embargo, existe información limitada sobre la dispersión y el aporte de los AM a la calidad del aire en esta ciudad, por lo que resulta importante conocer el intercambio océano-atmosfera de contaminantes o el aporte del mar a los aerosoles marinos que influyen sobre la calidad del aire en la zona. Es importante además determinar el impacto espacio-temporal del aporte de PM₁₀ con el fin de contar con herramientas que puedan ser utilizadas para el desarrollo de políticas de control de emisiones atmosféricas. En este estudio se investigó la dispersión, y concentración de los aerosoles PM₁₀ originado en la ciudad de Riohacha, y su aporte a la masa de contaminante PM₁₀.

METODOLOGÍA

Se presenta la metodología empleada en la investigación, desarrollada en tres secciones que comprenden: descripción del lugar de estudio, muestreo de PM₁₀ y Modelo de dispersión.

Área de estudio

El estudio se desarrolló en el área urbana de Riohacha (AUR, 11,3 N - 72,5 O), ubicada al norte de Colombia (Fig. 1). La ciudad está ubicada a orilla del Mar Caribe en la margen occidental de la desembocadura del río

Ranchería. El área urbana cubre aproximadamente 32 km² y se encuentra a 10 m sobre el nivel del mar en promedio, con una población aproximada de 300.000 habitantes (Gobernación de La Guajira, 2016). AUR tiene una flota aproximada de 29.000 vehículos automotores, que representan el 0,3% de la flota de vehículos automotores en Colombia (DNP, 2014). La actividad industrial es nula. Se caracteriza por su clima tropical seco influenciado por los vientos alisios del nordeste y corrientes marinas del noreste con oleaje fuerte. Con un intervalo de temperatura entre 19 °C y 37 °C, con promedio de temperatura aproximado de 20 °C. Valores de humedad relativa entre 69% y 88%, con promedio 69%. Con vientos predominantes en la dirección noroeste, con velocidad promedio de 2,2 m/s.

Fig. 1. Ubicación geográfica de AUR y sitios de muestreo seleccionados: CC (Centro Cultural), MT (Muelle Turístico) y MA (Anas Mai), IM (Ideam). Panel izquierdo: modificado del Mapa de Colombia (orografía) .svg Wikipedia, <https://goo.gl/Wg6TZl>, accedido el 2016-03-02; fuente del panel derecho: Google Earth v7.1.5.1557, 2018-03-02, DigitalGlobe 2018. <http://www.earth.google.com>, acceso 2017-12-10).

Muestreo de PM₁₀

Se seleccionaron tres sitios de muestreo, en función de su ubicación para rodear la longitud de playa que limita con el área urbana de Riohacha. Dos puntos fueron ubicados a orilla del mar: Centro Cultural (CC) y Centro de Convenciones Anas Mai (MA), y un punto ubicado a 300 metros mar adentro: Muelle Turístico (MT) (Fig. 1, Tabla 1). Las muestras de PM₁₀ se recolectaron continuamente de Octubre a Diciembre de 2016. Se utilizaron muestreadores de mínimo volumen, MiniVol TAS adquiridos de Air Metrics (Eugene, OR, EE. UU.). Éstos fueron equipados con filtros de fibra de vidrio de 47 mm de diámetro, con un tamaño de poro de 2 µm, adquiridos en Sigma-Aldrich (St Louis, MO, EE. UU.).

Tabla 1: Sitios de muestreo seleccionados y sus coordenadas geográficas y elevación sobre el nivel del mar (m)

ID Sitio	Nombre Sitio	Latitud, °	Longitud, °	Elevación (m)	Variables medidas
CC	Centro Cultural	11° 33' 2.0" N	72° 54' 54" O	0	PM ₁₀
MT	Muelle Turístico	11° 33' 2.0" N	72° 54' 33" O	0	PM ₁₀
MA	Anas Mai	11° 33' 21" N	72° 53' 55" O	0	PM ₁₀
IM	IDEAM	11° 31' 44" N	72° 55' 64" O	4	T, ws, wd

Se tomaron 10 muestras en cada sitio, cada tercer día, en periodos de muestreo de 24 horas para un total de 30 muestras recolectadas. Todas las muestras de PM₁₀ fueron procesadas y analizadas usando técnica gravimétrica, siguiendo el método de referencia del Código de Regulaciones Federales (Apéndice J a la Parte 50 para PM₁₀) (EPA, 1999). Los filtros fueron preparados en los laboratorios acreditados de la Corporación Regional Ambiental de la Guajira (Corpoguajira). Brevemente, cada filtro se acondicionó a 30 ± 10% de humedad relativa, y 20 ± 2 °C durante 24 h y se almacenó a 4 ± 2 °C antes y después del análisis. La diferencia de peso entre los filtros limpios y expuestos se registró utilizando una balanza analítica RADWAG, Modelo

MYA 11.3, con capacidad Máxima de 11g y Mínima de 0,1mg. (Paisippany, NJ, EE. UU.), con una precisión de 0,01 mg. Los filtros después de su análisis, se almacenaron adoptando las condiciones descritas en la resolución número 0650 de 2010, por la cual se adopta el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en Colombia (MAVDT, 2010). Adicionalmente, las variables meteorológicas, como temperatura (T), velocidad del viento (ws) y dirección del viento (wd), se obtuvieron de la estación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Modelo de dispersión

Se utilizó el modelo tipo Puff CALPUFF, que es una combinación entre modelos Gaussianos y Lagrangianos que calcula la dispersión de una emisión instantánea de contaminantes a lo largo de una trayectoria (MMA, 2012). Para el análisis de dispersión de las concentraciones de PM₁₀ se utilizó un dominio de modelación que abarcó una rejilla de 20 km x 20 km con resolución de celdas de 1 km² y 5 niveles de alturas verticales 20, 30, 50, 80 y 100 m que abarca toda el área de la ciudad de Riohacha. La información de elevación digital y usos del suelo fueron obtenidas de la base de datos SRTM1 generada por la NASA y la U.S. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) y de la base de datos Global Land Cover Characteristics – GLCC con una resolución de 1 kilómetro (<https://lta.cr.usgs.gov/srtmus1n.html>). Se utilizó el procesador meteorológico CALMET para desarrollar campos tridimensionales de vientos y temperaturas para la simulación de flujos complejos sobre el terreno de la ciudad con datos meteorológicos en superficie y radiosondeos obtenidos de la estación IDEAM. Los datos horarios extraídos en superficie requeridos como datos de entrada al programa fueron temperatura, precipitación media anual, presión atmosférica, humedad relativa, dirección del viento, velocidad del viento, nubosidad, y altura de las nubes. Para calcular la concentración de AM, el CALPUFF contiene módulos para diversas modelaciones, como terrenos complejos, el transporte de partículas de aerosol sobre el agua, los efectos de interacción costeras (Scire et al., 2000). Para estimar la tasa de emisión de AM en el área de estudio, se utilizó la formulación semi-empírica de Monahan et al. (1986). Esta técnica, estima la generación de aerosoles de sal marina en función de la velocidad del viento en la superficie, el área de exposición y el tamaño de partícula en estudio. Se han producido buenos resultados en modelación de aerosoles de sal marina utilizando esta ecuación (Callaghan, 2013; Gong, 2003). Para estimar el factor de emisión, se calculó el área de exposición en función de la ubicación de los muestreadores a orilla de playa y mar adentro (ver Fig. 1). Se estimó un área comprendida entre aproximadamente 1000 metros mar adentro y la distancia entre los puntos de muestreo CC y MA.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se presentan los resultados de la dispersión y concentración de partículas PM₁₀ en una ciudad costera del Caribe.

Meteorología

Los datos meteorológicos (Tabla 2), fueron suministrados por la estación meteorológica Almirante Padilla del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), ubicada en el aeropuerto de la Ciudad de Riohacha (punto IM de la Fig. 1). La temperatura registró un promedio de 29,10 °C, con máximo de 39,3 °C y mínimo de 24,10 °C. La velocidad del viento registró un promedio de 3,31 m/s alcanzando valores máximos cercanos a los 8,20 m/s y periodos de calma (velocidad del viento de 0 m/s). La dirección predominante del viento fue este-noreste (ENE 67.5°) en un 90 %.

Tabla 2: Descripción de los parámetros meteorológicos en el periodo de muestreo

Parámetro	Media (Desv. Est)	Máximo	Mínimo
Temperatura (°C)	29,10(2,74)	34,0	17,6
Viento (m/s)	3,31(0,70)	8,20	0,00
Humedad Relativa (%)	67,73(5,36)	85,0	64,0
Presión barométrica (mmHg)	758 (10)	760	755

La humedad relativa en la ciudad registro un promedio aproximado de 68%, con máximo de 80% y mínimo de 50%. La presión barométrica registró valores coherentes con ciudades a nivel de mar (760 mmHg). No se registró precipitaciones en el periodo de estudio.

Concentraciones de PM₁₀

La Figura 2a, muestra la distribución de la concentración de PM₁₀, en los tres sitios de muestreo. En el gráfico de caja se observa la mediana, el intervalo de confianza del 95%, el cuartil superior con el 75% y el inferior

con el 25%, la distribución de los promedios, los valores máximos y mínimos muestreados en cada estación. Los resultados (Fig. 2a) muestran una diferencia estadística entre los promedios de las estaciones. Las estaciones MA y CC, presentan un comportamiento similar; observándose mayor dispersión en la estación MA. En los sitios de muestreo MA y MT, la media fue menor que la mediana mostrando que la distribución del conjunto de datos es asimétrica sesgada a la izquierda, a diferencia del sitio CC donde la media fue mayor que la mediana mostrando una distribución del conjunto de datos asimétrica sesgada a la derecha.

La Fig.1a, muestra que en el sitio CC se observan valores atípicos en ambos bigotes; a diferencia de la estación MA y CC que presentan datos asimétricos que no están distribuidos normalmente. La Figura 2b, muestra la variación temporal de las concentraciones de PM₁₀. La estación MT, ubicada a 300 metros mar adentro, presenta mayores niveles de concentración (Fig. 2b), influenciando mayor aporte de AM. Se puede establecer, que en promedio para los tres sitios de muestreo, la concentración de PM₁₀ es de $39.94 \mu\text{g m}^{-3}$, ($\text{CI}_{95\%}$ $27.07 - 52.80 \mu\text{g m}^{-3}$) y con una desviación estándar de $18,60 \mu\text{g m}^{-3}$. El mayor promedio en las concentraciones se registró en el sitio MT con un $53.63 \mu\text{g m}^{-3}$, ($\text{CI}_{95\%}$, $44.69 - 61,84 \mu\text{g m}^{-3}$), con una desviación de $7,94 \mu\text{g m}^{-3}$. Esta estación se encontraba ubicada a 300 metros hacia el interior del mar, lo que puede mostrar mayor concentración de PM₁₀ por su ubicación. Le siguen en nivel de concentración la estación MA con $33.60 \mu\text{g m}^{-3}$, ($\text{CI}_{95\%}$, $23.30 - 43.90 \mu\text{g m}^{-3}$), con desviación estándar de $10,30 \mu\text{g m}^{-3}$ y con menor promedio en las concentraciones, el sitio CC con $33.08 \mu\text{g m}^{-3}$, ($\text{CI}_{95\%}$, $23.15 - 43.01 \mu\text{g m}^{-3}$) y desviación estándar de $9,33 \mu\text{g m}^{-3}$.

Fig. 2: a: Boxplot de las concentraciones de PM₁₀ para todos los sitios de muestreo seleccionados durante el estudio; b: Variación temporal de las concentraciones de PM₁₀ para todos los sitios de muestreo.

Dispersión de aerosoles marinos

La Figura 3 muestra las concentraciones de PM₁₀ obtenidas mediante el uso del modelo CALPUFF durante cinco días. Los resultados muestran que las áreas con las concentraciones más altas corresponden a la ubicación de las fuentes de emisión, específicamente donde se origina la emisión de aerosoles. Estos resultados coinciden con los datos medidos en campo, donde el punto de mayor concentración fue MT (53,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), punto que se ubicó 300 metros mar adentro de la playa. Las concentraciones de PM₁₀ disminuyeron al aumentar la distancia desde la fuente de emisión igual que disminuyeron las concentraciones medidas en CC y MA, puntos ubicados a orilla de playa.

El puff de concentración toma rumbo sur oeste contrario a la dirección del viento predominante en la zona de estudio. Puede verse que la dispersión de los mismos se incrementa a más de 20 km de la playa, abarcando toda la zona urbana del Distrito de Riohacha, con menores concentraciones al alejarse de la zona costera. Se puede apreciar en la figura 4, que el intervalo entre 5 y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bordea las calles más próximas a la playa (Centro Histórico de Riohacha y comercial), el intervalo de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se ubica en el centro de la ciudad (zona Residencial) y disminuye su concentración ($< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) hacia el sur del distrito. Los resultados del estudio de dispersión, indican variaciones significativas en las emisiones de AM día a día. La condición meteorológica del microclima de la ciudad (temperatura, humedad relativa, etc.) podría afectar significativamente la tasa de emisión de AM así como las concentraciones de AM viento abajo de la emisión. En el día 2, se presentan los mayores niveles concentraciones de AM, coincidiendo con las menores velocidades del viento registradas. Estas masas de AM avanzan muy cerca de la ciudad de Riohacha. Para el día 3 se observa un incremento en la formación de AM, mar adentro, con dispersión de concentraciones mínimas de AM hacia la ciudad. Para el día 4 existe un aumento de las concentraciones de AM dispersadas en la ciudad de Riohacha. En el día 5 se alcanza la máxima dispersión de los AM, coincidiendo con mayores registros de velocidades de viento para ese día.

Fig. 3. Dispersión de concentraciones de aerosoles marinos PM₁₀.

La Tabla 3 muestra los datos estadísticos de la concentración de aerosoles marinos estimados y medidos en cada punto de muestreo (CC, MT y MA) durante los cinco días modelados. Se puede observar mayor correlación en el punto MT entre las concentraciones estimadas y medidas ($r^2 = 65$). Este punto de muestreo está más cerca de la zona de mayor emisión. De igual manera, se observa coincidencia entre los máximos y mínimos en esta estación. Sin embargo, la relación entre las medias de las concentraciones estimadas y medidas en este punto, representa un 27%, lo que indica otros aportes regionales.

Tabla 3: Concentraciones estimadas y medidas de aerosoles marinos en cada punto de muestreo

Puntos de Muestreo	CC		MT		MA	
Estadísticos	Estimado	Medido	Estimado	Medido	Estimado	Medido
Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	6,19	33,08	13,39	53,63	6,51	33,60
Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	9,55	66,45	21,20	77,98	10,61	65,26
Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,65	2,82	2,48	30,25	0,84	8,19
r^2	0,45		0,65		0,46	

En las estaciones CC y MA, se observa correlación baja entre las concentraciones estimadas y medidas. Puede asociarse esta baja correlación al posible aporte de PM₁₀, de otras fuentes (Transporte, resuspensión de polvo) que están cerca a estos puntos. Aunque son una muestra pequeña de PM₁₀ (n= 10) en cada estación. Se puede aproximar un aporte de AM a la masa de material particulado PM₁₀ entre el 20 al 27%. Margorzata et al., (2012) y Manders et al., (2010), mostraron resultados de modelación de la distribución de sodio, como aerosol marino, donde se muestra mayor concentración de sal marina sobre el océano abierto y disminuyen gradualmente desde la línea costera a las ubicaciones en el interior. Este mismo comportamiento se obtuvo en este estudio.

CONCLUSIONES

El CALPUFF representa una buena herramienta para la simulación y estimación de niveles ambientales por emisión de PM₁₀ de fuentes marinas. Fue coherente con los resultados de la tasa de emisión de AM estimada en el estudio. La acumulación de contaminantes cerca del origen (<1 km) de emisión está relacionada con la influencia directa de los vientos que transportan los aerosoles y lo llevan al continente. El estudio arrojó estimaciones de mayores concentraciones a velocidad del viento menores. Sin embargo, menor velocidad del viento también ocasiona menor emisión de AM. Las concentraciones de mayor nivel se presentaron en el punto de muestreo ubicado mar adentro; sin embargo, la estimación de aporte entre este punto (27%) y los que estaban a orilla de playa (20%) no presentan diferencias significativas. El aporte de aerosoles marinos a la masa de PM₁₀ puede ser significativo según las condiciones meteorológicas, llegando a representar entre el 20 y 27%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo logístico y financiero de la Universidad de La Guajira, al IDEAM por la provisión de información meteorológica de la Ciudad de Riohacha y a Corpoguajira por el apoyo logístico en el procedimiento de pesaje de los filtros.

REFERENCIAS

- Argumedo, C. J., J.R. Castillo, Caracterización Química de material particulado fracción respirable pm 10 en la atmósfera de Riohacha la Guajira Colombia, doi: 10.19053/1900771X.v17.n1.2017.4645, Ingeniería Investigación y Desarrollo, 17(1), 5-16 (2016)
- Buseck, P., D. Jacob, M. Posfai, J. Li y J. R. Anderson, Minerals in the air: An environmental perspective, International Geology Review, 42, 577-593 (2000)
- Callaghan, A. H., An improved whitecap timescale for sea spray aerosol production flux modeling using the discrete whitecap method, doi.org/10.1002/jgrd.50768, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 118(17), 9997–10010 (2013)
- Dirección Nacional de Planeación, DNP, Acuerdo Estratégico de Desarrollo Urbano, Riohacha: Entidades del Orden Nacional con los Municipios de Riohacha y Maicao, Riohacha, Colombia, 1-14 (2014)
- EPA, Reference Method for the Determination of Particulate Matter as PM₁₀ in the Atmosphere. 40CFR50, Appendix J, United States of America Environmental Protection Agency, United States of, Research Triangle Park, NC, USA (1999)
- European Environment Agency, EEA. Air quality in Europe. Technical Report, doi: 10.2800/22775, Luxembourg, 1-84 (2014)
- Fan, S. M., Modeling of observed mineral dust aerosols in the arctic and the impact on winter season low-level clouds, doi:10.1002/jgrd.50842, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 118(19), 11161–11174 (2013)
- Gantt, B., J.T. Kelly y J.O. Bash, Updating Sea Spray Aerosol Emissions in the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model version 5.0.2, doi: 10.5194/gmd-8-3733-2015, Geoscientific Model Development, 8(11), 3733-3746 (2015)
- Gobernación de La Guajira, Plan de desarrollo 2016 - 2019: Gobernación de La Guajira "Oportunidad para Todos y Propósito de País", Riohacha, Colombia (2016)
- Gong, S.L., A Parameterization of Sea-Salt aerosol Source Function for sub and super-micron Particles, doi: 0.1029/2003GB002079, Global Biogeochemical Cycles, 17(4), 1-8 (2003)
- Khaniabadi, Y. O., R. Polosa y otros diez autores, Human Health Risk Assessment Due to Ambient PM₁₀ and SO₂ by an Air Quality Modeling Technique, doi: 10.1016/j.psep.2017.07.018, Process Safety and Environmental Protection, 111, 346-354 (2017)
- Kim, K., E. Kabir, S. Kabir, A review on the human health impact of airborne particulate matter, Environment International, 74, 136-143 (2015)
- Lang-Yona, N., Y. Lehaña, B. Herut, N. Burshtein e Y. Rudich, Marine Aerosol as a Possible Source for Endotoxins in Coastal Areas, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.08.054, Science of the Total Environment, 499(1), 311-318 (2014)
- Leiva, M., D.A. Santibañez, E.S. Ibarra, C.P. Matus y R. Seguel, A five-year study of particulate matter (PM_{2.5}) and cerebrovascular diseases, Environmental Pollution, 181, 1-6 (2013)

- Lippmann, M., Human Exposures and Their Health Effects, doi: 10.1002/9780470442890, Environmental Toxicants, Third Edition (3rd Ed.), Hoboken, New Jersey (2008)
- Manders, A.M., M. Schaap, X. Querol, M.F.M.A. Albert, J. Vercauteren, T.A.J. Kuhlbusch y R. Hoogerbrugge, Sea salt concentrations across the European continent, *Atmospheric Environment*, 44(20), 2434-2442 (2010)
- Margorzata, W., M. Kryza, A. Dore, S. Hallsworth y M. Błaś, Modelling emission, concentration and deposition of sodium for Poland, *Int. J. Environment and Pollution*, 50 (1-4), 164-174 (2012)
- MAVDT., Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010)
- Ministerio de Medio Ambiente de Chile, MMA., Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA, pp. 1-112, Chile (2012)
- Monahan, E. C., D. E. Spiel y K. L. Davidson, A Model of Marine Aerosol Generation Via Whitecaps and Wave Disruption, *Oceanic Whitecaps: And Their Role in Air-Sea Exchange Processes*, Monahan E.C., Niocaill G.M. (Eds.), pp. 167-174, Netherlands (1986)
- OMS., Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, Organización Mundial de la Salud, Ginebra (2005)
- Pérez, L., A. Tobías y otros cinco autores, Coarse Particles From Saharan Dust and Daily Mortality, doi:10.1097/EDE.0b013e31818131cf, *Epidemiology*, 19(6), 800-807 (2008)
- Rojano, R., H. Arregoces y G. Restrepo, Composición elemental y fuentes de origen de partículas respirables (PM₁₀) y Partículas Suspendidas Totales (PST) en el área Urbana de la Ciudad de Riohacha, Colombia, doi: 10.4067/S0718-07642014000600002, *Información Tecnológica*, 25(6), 3-12 (2014)
- Scerri M., K. Kandler y S. Weinbruch, Disentangling the contribution of Saharan dust and marine aerosol to PM10 levels in the Central Mediterranean, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.10.028, *Atmospheric Environment*, 147, 395-408 (2016)
- Scheuvers, D., L. Schütz, K. Kandler, M. Ebert, S. Weinbruch, Bulk composition of northern African dust and its source sediments, doi:10.1016/j.earscirev.2012.08.005, *Earth-Science Reviews*, 116(1), 170-194 (2013)
- Scire, J.S., D.G. Strimaitis y R.J., Yamartino, A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model. Eearth Tech. Inc, (January), 521 (2000)
- Tobías, A., L., Pérez, J. Díaz, C. Linares, J. Pey, A. Alastruey, X. Querol, Short-term effects of particulate matter on total mortality during Saharan dust outbreaks: A case-crossover analysis in Madrid (Spain), doi:10.1016/j.scitotenv.2011.10.027, *Science of the Total Environment*, 412–413, 386–389 (2011)
- Zhou, M. y otros seis autores, Chemical characteristics of fine particles and their impact on visibility impairment in Shanghai based on a 1-year period observation, doi: 10.1016/j.jes.2016.01.022, *Journal of Environmental Sciences*, 48, 151-160 (2016)