

Intrusiones de polvo africano en la región Caribe de Colombia

African dust intrusions in the Caribbean region of Colombia

Omar Javier Ramírez Hernández*

Fecha de recepción: 2 de abril de 2014

Aceptación: 17 de noviembre de 2014

Recibido versión final: 1 de diciembre de 2014

Resumen

El transporte intercontinental de material mineral desde África hacia el Caribe, Norteamérica y Suramérica es un fenómeno de interés investigativo internacional. Varios estudios han llamado la atención sobre los efectos meteorológicos y las implicaciones climáticas derivadas de la presencia de este aerosol en la atmósfera, como también de los potenciales efectos sobre la salud humana. La región Caribe colombiana no es ajena a esta problemática, pero son escasos los estudios realizados. Por lo anterior, el objetivo de este artículo es identificar eventos de intrusión de polvo de origen africano en la región Caribe de Colombia. Metodológicamente se analizaron mapas de concentración de polvo generados por los modelos GEOS-5, SKIRON, NAAPS y CALIPSO, entre el 01 de enero y el 31 de diciembre de 2012. También se utilizaron imágenes generadas por el sensor satelital MODIS e información de redes de calidad del aire de la región. Según los resultados obtenidos, existen evidencias para afirmar que al norte de Colombia, en la región Caribe, se detectan eventos de intrusión de polvo de origen africano. El periodo del año en que se presentan mayores niveles de concentración es entre marzo y septiembre, sobresaliendo los meses de marzo, junio, julio y agosto.

Palabras clave

Modelación atmosférica, polvo Sahariano, calidad del aire, meteorología, transporte de polvo, polvo mineral.

Abstract

The intercontinental transportation of mineral material from Africa to the Caribbean, North America and South America is an international phenomenon of research interest. Several studies have drawn attention of meteorological effects and climatic implications resulting from the presence of this aerosol in the atmosphere, as well

* Ingeniero Ambiental y Sanitario, MSc. Tecnología Ambiental, MSc. Sistemas Ambientales Humanos y estudiante del Doctorado en Ciencia y Tecnología Industrial y Ambiental. Docente de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia de Colombia (UNAD). Nacionalidad: colombiana. Correo electrónico: omar.ramirez@unad.edu.co.

as its potential adverse effects on human health. The Colombian Caribbean region is not immune to this problem, although there are few studies about it. Therefore, the aim of this paper is to identify events of intrusion of African dust over the Caribbean region of Colombia. The procedure followed in this investigation was the analysis of dust concentration maps generated by the GEOS-5, SKIRON, NAAPS and CALIPSO models between 01 January and 31 December 2012. Images generated by the MODIS satellite sensor and data from regional air quality monitoring network were also used. According to the results obtained, there are evidences that confirm that in the north of Colombia, specifically in the Caribbean region, events of intrusion of African dust are detected. The period of time with higher levels of concentration are presented between March and September, with prominent levels in March, June, July and August.

Keywords

Atmospheric modeling, Saharan dust, air quality, meteorology, dust transport, mineral dust.

Introducción

El material particulado atmosférico se define como un conjunto de partículas sólidas y líquidas presentes en suspensión en la atmósfera (Mészáros 1999). Es decir, por este concepto se entiende un conjunto heterogéneo de partículas emitidas por diversas fuentes (naturales y antrópicas), con el potencial de generar, según su composición biogeoquímica y tamaño, efectos adversos en la salud humana tales como trastornos respiratorios (Cowie et al. 2010) y enfermedades cardiovasculares (Middleton et al. 2008).

Dentro de los principales tipos de partículas atmosféricas figura el material mineral, el cual constituye, en cuanto a masa, la mayor fracción del aerosol atmosférico² (Duce 1995). La emisión de estas partículas se genera, principalmente, por medio de la acción de los vientos sobre la superficie terrestre.

2. Generalmente los términos *material particulado atmosférico* y *aerosol atmosférico* son utilizados como sinónimos, aunque esto no es del todo preciso. El primer concepto es más amplio y engloba tanto las partículas en suspensión como las partículas sedimentables (diámetro > 20 µm), mientras el segundo hace referencia al grupo de partículas sólidas o líquidas transportadas por el aire, de un tamaño entre 0,01 y 10 µm, que pueden "sobrevivir" en la atmósfera al menos durante unas horas (Solomon et al. 2007).

La mayor emisión a escala mundial de polvo mineral se produce en regiones áridas o semi-áridas del hemisferio Norte (entre 10° y 35°), donde se estima que África, especialmente la región comprendida por las zonas del Sahara y Sahel, es la responsable de cerca del 70% de los aportes globales (Huneeus et al. 2011), al generar desde 130 millones Tn/año (Swap et al. 1996) hasta 800 Tn/año (Huneeus et al. 2011).

A pesar de que la mayor parte de las emisiones de material mineral es de origen natural, es necesario considerar también las fuentes de origen antrópico, como por ejemplo las actividades de construcción, la minería, la fabricación de cerámicas y cemento, e incluso el tráfico automotor a través de la erosión del firme de rodadura (Querol et al. 2001).

Ahora bien, son múltiples los estudios que se han realizado sobre el transporte de polvo de origen africano a través del Océano Atlántico y su deposición en el continente americano. Así, desde finales de la década de los años sesenta se tiene información de las grandes cantidades de polvo provenientes de zonas áridas de África que viajan con los vientos alisios e ingresan al Caribe (Prospero et al. 1970), y desde los años ochenta se tiene registro de este fenómeno en Suramérica (Prospero et al. 1981). Esto ha permitido el desarrollo de estudios

más específicos relacionados con la alteración de la calidad del aire de Barbados, Bahamas y la zona Este de los Estados Unidos por efecto del polvo sahariano (Muhs et al. 2009, Kim et al. 2014), su composición elemental (Trapp et al. 2010) y los efectos indirectos de este aerosol sobre los procesos de formación de nubes (Sassen et al. 2003); la variabilidad de la precipitación sobre el Atlántico tropical (Huang et al. 2009); y la alteración del balance de nutrientes del suelo amazónico (Abouchami et al. 2013), así como de la composición bioquímica del agua del Océano Atlántico (Schulz et al. 2012). Incluso hay estudios que analizan el transporte de microorganismos adheridos a estas partículas (Kellogg y Griffin 2006), algunos de los cuales han puesto en evidencia que el polvo puede proporcionar sombra y una manera de captar humedad del aire, lo que ayuda a los microorganismos a sobrevivir a las fuertes condiciones de deshidratación y exposición a rayos ultravioleta (UV) durante su largo viaje (Yamaguchi et al. 2012). No obstante, aunque es razonable suponer que dentro de este proceso puede presentarse transporte de organismos patógenos, ningún estudio ha demostrado hasta el momento una relación causa/efecto definitiva entre el movimiento de agentes bacterianos y la aparición de enfermedades (Griffin 2007).

Todas estas investigaciones señalan la importancia de analizar la presencia de polvo de origen africano en el Caribe y Suramérica, ya que evidencian sus implicaciones climáticas (Prospero y Lamb 2003) y ambientales (Prospero et al. 2014), así como los potenciales efectos negativos sobre la salud de la población expuesta (Griffin et al. 2001).

Aunque la bibliografía internacional sobre el tema es extensa, son escasos (por no decir inexistentes) los estudios realizados en Colombia que aborden esta problemática. Por tal razón, y teniendo en cuenta que el material particulado es el contaminante que más deteriora la calidad del aire en el país (IDEAM 2007), la presente investigación tiene como objetivo identificar eventos de intrusión de polvo de origen africano sobre la región Caribe colombiana, tomando como periodo de estudio el año 2012.

Metodología

Área de estudio

La región Caribe, ubicada al norte de Colombia, está conformada por siete departamentos en la parte continental (Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, La Guajira, Magdalena y Sucre), y uno insular (San Andrés, Providencia y Santa Catalina), los cuales representan el 11,6% del territorio nacional (Aguilera et al. 2013).

Por su situación geográfica, la región Caribe está bajo la influencia de los desplazamientos Norte - Sur de la Zona de Convergencia Intertropical - ZCIT. Además, la región se ve afectada por las circulaciones de los vientos alisios (vientos del N y NE) (CIOH 2010), por lo que el promedio anual del régimen de vientos es de dominio de dirección Norte y Este.

Análisis de dispersión de polvo

Para la identificación de episodios de intrusión de masas de aire de origen africano con material particulado (polvo) procedentes del norte de África, se generaron y analizaron mapas de aerosoles diarios entre el 01 de enero y el 31 de diciembre de 2012, a las 12:00 UTC (*Coordinated Universal Time*, Tiempo Universal Coordinado), generados por diferentes modelos (GEOS-5, SKIRON, NAAPS y CALIPSO). También se utilizaron imágenes de satélite generadas por el sensor MODIS. A continuación se describe brevemente cada uno de estos elementos.

- **GEOS-5** (*Goddard Earth Observing System Model, version 5*. <http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov>) es un sistema de modelos integrados con *Earth System Modeling Framework* (ESMF). Este modelo integra *GEOS-5 Data Assimilation System* (GEOS-5 DAS) con el estadístico de interpolación *Gridpoint Statistical Interpolation* (GSI), desarrollado conjuntamente entre *National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA* y *National Centers for Environmental Prediction – NCEP* de los Estados Unidos. El sistema GEOS-5 fue desarrollado para apoyar investigaciones de

la NASA relacionadas con el análisis de datos de ciencias de la tierra, modelación del clima, predicción del tiempo (entre otras aplicaciones) y ha sido utilizado a nivel internacional en diversas investigaciones científicas (Reale et al. 2009, Yasunari et al. 2011). Las especificaciones técnicas del modelo se describen en Suarez (2012). Con este modelo se obtuvieron 358 mapas diarios del espesor óptico de aerosol (*dust AOD*) a 550 nm y 12 UTC.

- **SKIRON** (<http://forecast.uoa.gr>) es una versión del modelo ETA/NCEP realizado por *Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group* de la Universidad de Atenas (Grecia), el cual ha sido utilizado a nivel internacional en multitud de investigaciones científicas (Kallos et al. 2006, Kukkonen et al. 2012). La versión actual cubre un área geográfica entre 24,15O y 51,75E y entre 12,90N y 53,40N. La resolución horizontal de las imágenes del Atlántico Norte es de 0,24 x 0,24 grados (~24 km). Para una descripción detallada de las especificaciones técnicas de este modelo ver Kallos et al. (1997).

SKIRON proporciona varios productos útiles para el presente estudio. Uno de ellos es el mapa de concentración de polvo cerca de la superficie (*dust concentration near ground*), estimado en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para esta investigación se obtuvieron en total 365 mapas de concentración diaria de polvo cerca de la superficie a 12 UTC.

- **NAAPS** (*Navy Aerosol Analysis and Prediction System*. <http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol>) es el modelo de predicción de aerosoles troposféricos de NRL/Monterrey (*Naval Research Observatory, U.S.Navy, EEUU*). Utiliza campos meteorológicos globales de *Navy Operational Global Atmospheric Prediction System* (NOGAPS). Este modelo realiza análisis y previsiones sobre una rejilla de 1 x 1 grado, a intervalos de 6 horas y 24 niveles verticales llegando a 100 mb. Para profundizar las especificaciones técnicas del modelo ver Hogan y Rosmond (1991). Al igual que los anteriores modelos, éste también ha sido utilizado a nivel

internacional en diferentes investigaciones científicas (Escudero et al. 2011, Sánchez de La Campa et al. 2011).

Con este modelo se consiguieron predicciones de concentración de polvo a nivel de superficie (*dust surface concentration*), medido en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 550 nm y 12 UTC. Así, para el periodo de análisis se obtuvieron en total 366 mapas de concentración de polvo a nivel de superficie.

- **CALIPSO** (*Cloud-Aerosol LIDAR and Infra-Red Pathfinder Satellite Observation*. <http://www-CALIPSO.larc.nasa.gov>) es un satélite polar de la NASA destinado para la observación satelital. Cuenta con un sistema LIDAR (*Light Detection and Ranging*) denominado *Cloud-Aerosol LIDAR with Orthogonal Polarization (CALIOP)*, que hace mediciones de retrodispersión a 532 y 1064 nm. Para consultar las especificaciones técnicas del funcionamiento de este satélite ver Winker et al. (2003) y Winker et al. (2004). La información arrojada por este satélite ha sido utilizada en diversas investigaciones a nivel internacional (Bridhikitti 2013, Leventidoua et al. 2013).

Para el caso del presente estudio se utilizaron imágenes de la versión 3,02 de CALIPSO, tanto en horario nocturno como diurno, con una retrodispersión atenuada total de 532 nm medida en $\text{km}^{-1}\text{sr}^{-1}$. A diferencia de los anteriores modelos, estas imágenes no se obtuvieron de forma diaria, ya que solamente se utilizaron para profundizar el análisis de los días críticos con mayor presencia de polvo.

- **MODIS** (*Moderate resolution Imaging Spectroradiometer*. <https://earthdata.nasa.gov/labs/worldview>) es un instrumento a bordo de los satélites TERRA y AQUA de NASA. Las imágenes proporcionadas por este sensor tienen una resolución espacial entre 250 y 1000 m y proporcionan alta sensibilidad radiométrica (12 bits) en 36 bandas espectrales que varían en longitud de onda de 0,4 micras a 14,4 micras. Las especificaciones técnicas de este sistema se

describen en: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>. Estas imágenes se utilizaron con el propósito de constatar información arrojada por los modelos anteriormente mencionados.

Finalmente, con la intención de analizar los resultados obtenidos con datos tomados en campo, se evaluó la disponibilidad de información de redes de monitoreo de calidad del aire en la región. Tras consultar el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE, se encontró que las redes que registraron concentraciones de PM₁₀ de forma periódica (cada tercer día) y continua (durante la mayor parte del año) fueron la de la Corporación Autónoma Regional de La Guajira – CORPOGUAJIRA y la de la

Corporación Autónoma Regional del Magdalena – CORPAMAG. De estas redes se consideraron los datos de las estaciones Alcatraces (localizada entre los municipios de Ciénaga y Santa Marta en el departamento de Magdalena) y Cuestecitas (localizada en el corregimiento del mismo nombre, en el departamento de La Guajira). Ambas estaciones se seleccionaron por reportar valores de referencia al ubicarse en áreas de baja influencia urbana.

Resultados

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de los tres modelos utilizados para la realización del presente estudio (GEOS-5, SKIRON y NAAPS). Posteriormente se analiza cada uno de ellos.

TABLA 1. Días por mes con presencia de polvo en la región Caribe colombiana durante 2012

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total		
													Días	%	
Modelo GEOS-5															
Días	2	3	30	18	26	30	30	30	23	0	0	3	195	53	
Modelo SKIRON															
Días	0	0	17	1	11	17	19	13	2	1	0	1	82	22	
Modelo NAAPS															
Días	13	11	24	1	8	12	13	9	4	1	0	3	99	27	

Fuente: el autor

Modelo GEOS-5 y CALIPSO

Tras el análisis de la profundidad óptica de aerosoles de polvo (*dust aerosol optical depth*) a 550 nm y 12 UTC con el modelo GEOS-5, se puede deducir que en el región Caribe se detectan varios días con presencia de polvo (proviene del norte de África) en el año 2012. En la Tabla 1 se resume el número de días por mes en los que se registraron dichos eventos.

Esto significa que entre marzo y septiembre fue el periodo en el que se detectó más presencia de

polvo en la atmósfera, donde marzo, junio, julio y agosto registraron el mayor número de días. En el caso de marzo, los días 14 y 29 presentaron niveles de profundidad óptica de polvo entre 0,1 y 0,15 (Figura 1, numerales a y b), lo que permite inferir presencia leve de este material, mientras los días 30 y 31 presentaron mayores niveles (entre 0,2 y 0,3, ver Figura 1, numerales c y d), con lo cual se deduce la existencia de polvo en la atmósfera. En los demás días se registraron niveles de espesor óptico inferiores de 0,1, incluso menores de 0,05.

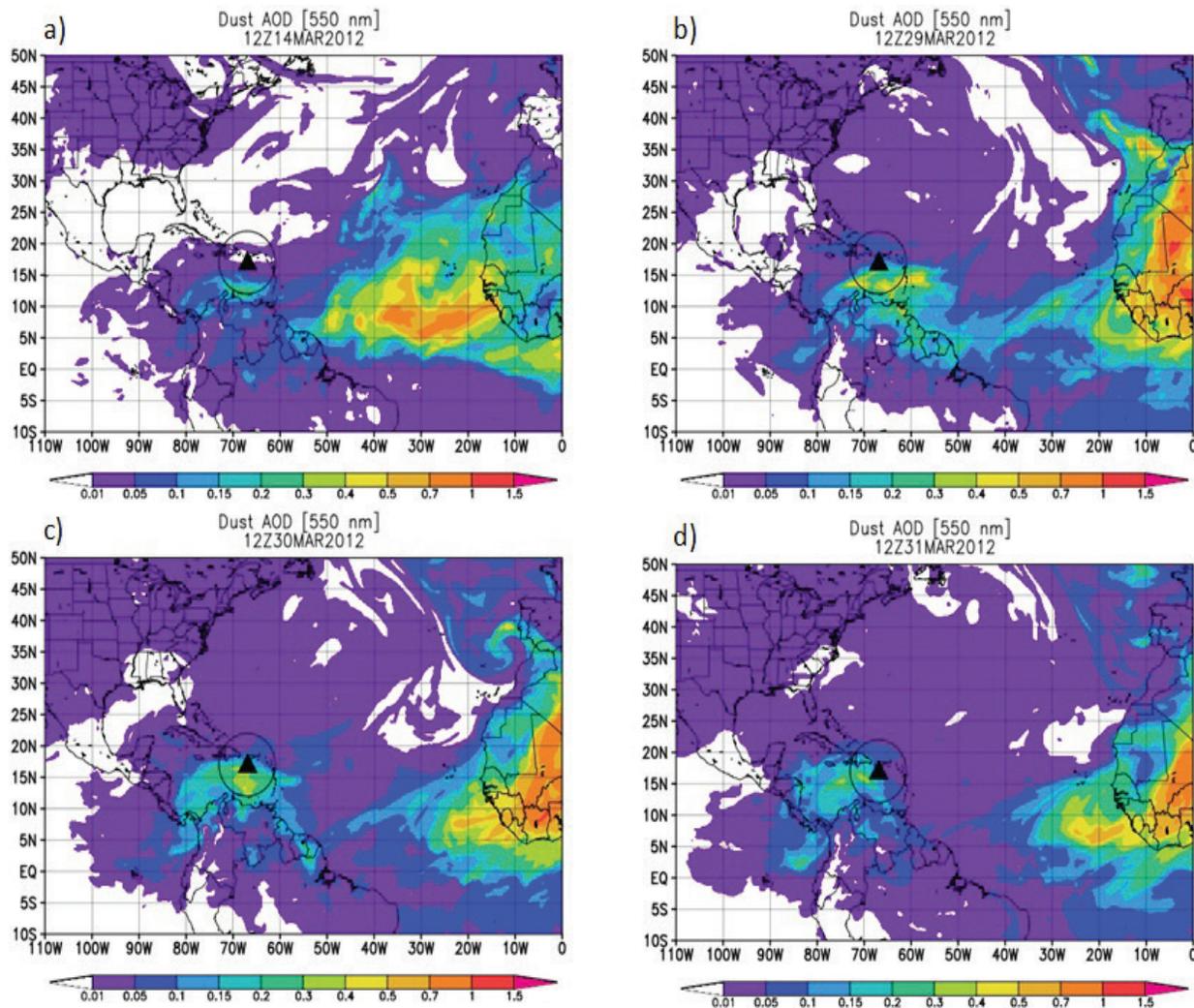


FIGURA 1. Espesor óptico de polvo en la región Caribe Colombiana, marzo de 2012. Fuente: <http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov>

Además de los días 30 y 31 de marzo, el 13 de julio se registró un significativo nivel de espesor óptico (entre 0,2 y 0,3). Los demás días de este mes, así como los de agosto, presentaron niveles de espesor óptico de polvo inferiores de 0,1. En junio se registraron durante los días 5, 19, 29 y 30, niveles de profundidad óptica de aerosoles de polvo entre 0,1 y 0,15, lo que permite deducir presencia leve de este material. Los demás días se presentaron niveles de espesor óptico de polvo inferiores de 0,1.

Al analizar la distribución vertical de los aerosoles en la atmósfera para los días en los que se registró

mayor nivel de espesor óptico de polvo (30 y 31 de marzo, y 13 de julio) por medio del modelo CALIPSO y con una retrodispersión atenuada total de 532 nm (en la Figura 2 se presenta el recorrido del satélite), se observa presencia de aerosoles en áreas cercanas a la superficie los primeros 2 km para el 30 de marzo y los primeros 3 km para los otros dos días (Figura 3). Al revisar el tipo de aerosol detectado a dichas alturas se evidencia, predominantemente, presencia de polvo y polvo contaminado (Figura 4).

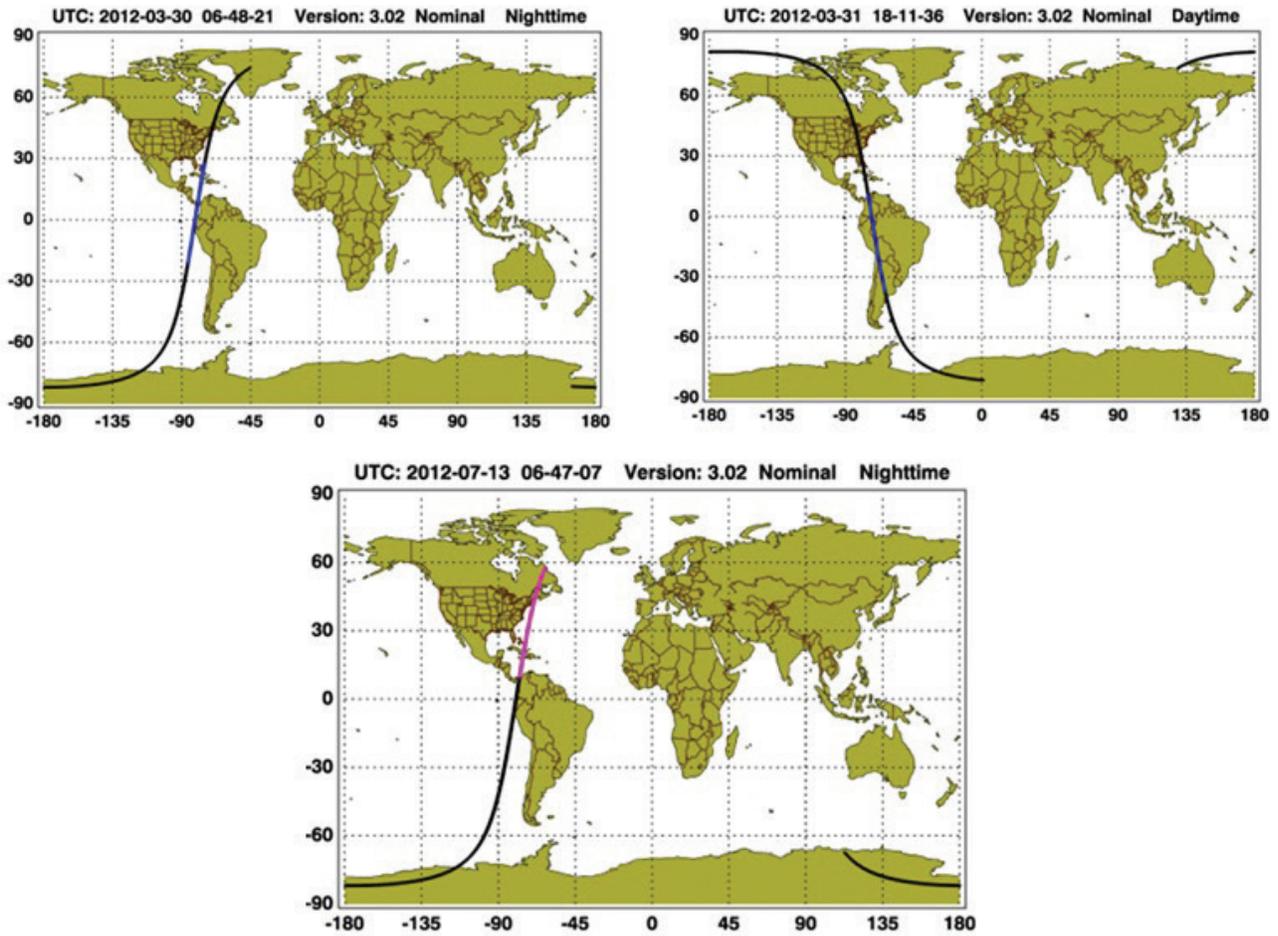
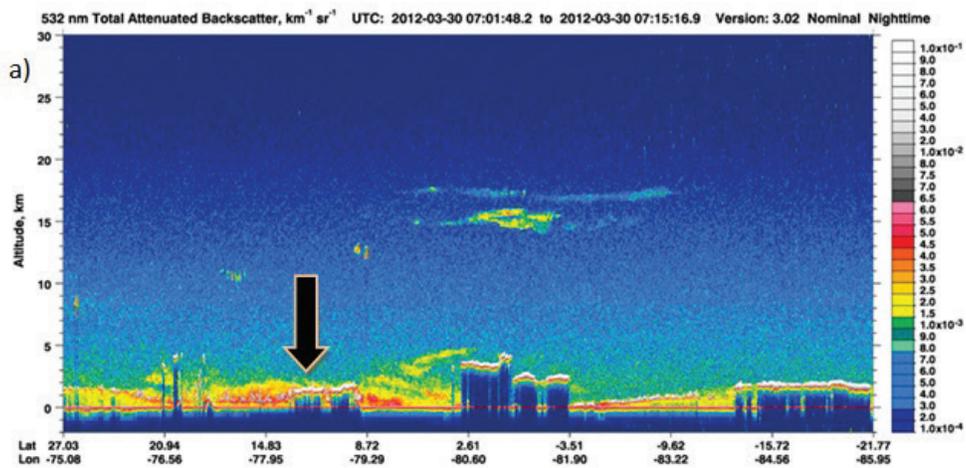


FIGURA 2. Recorrido del satélite CALIPSO, 30 y 31 de marzo y 13 de julio de 2012. Fuente: <https://www-calipso.larc.nasa.gov>



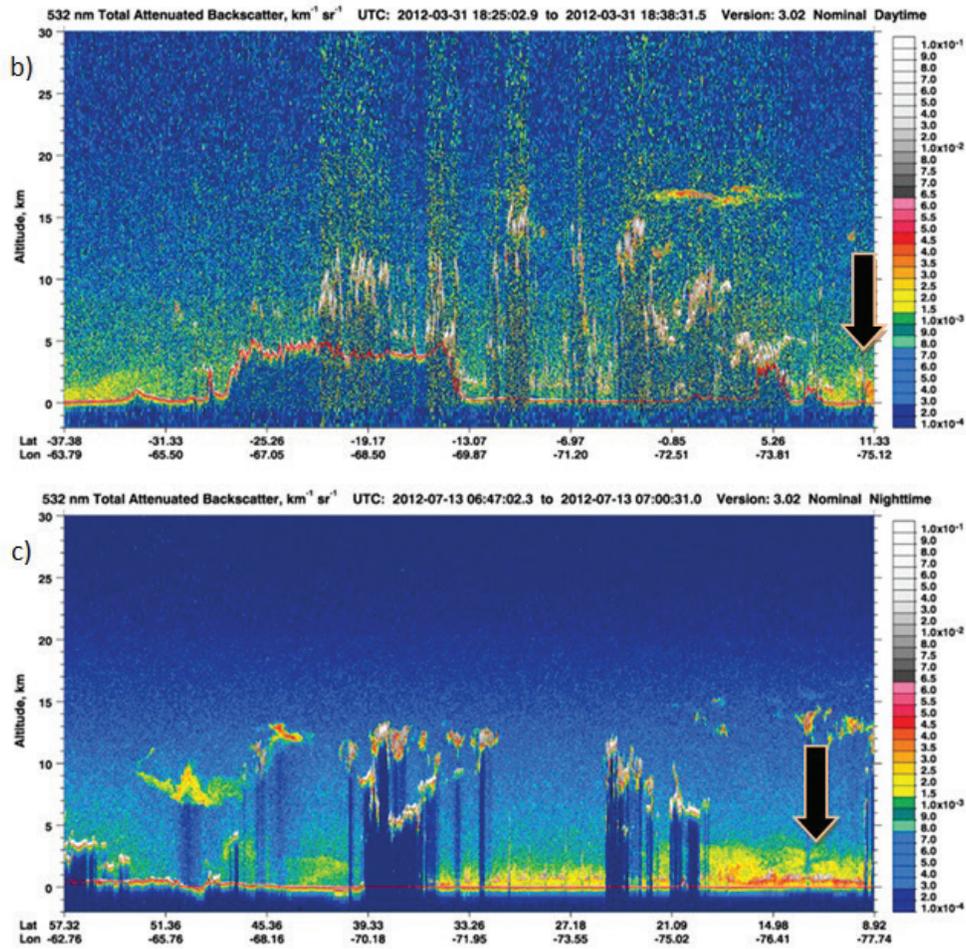
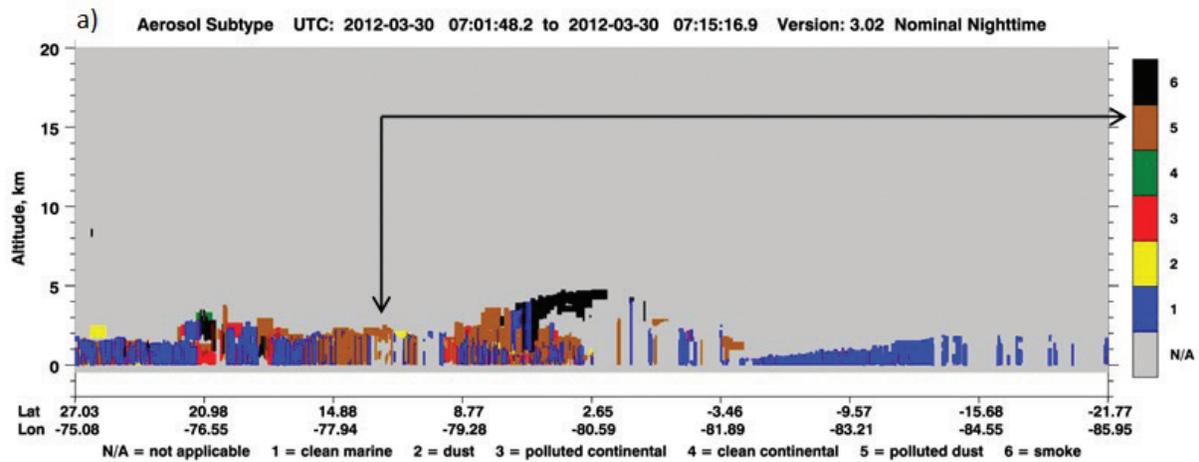


FIGURA 3. Perfil CALIPSO: a) horario nocturno, 30 de marzo 2012; b) horario diurno, 31 de marzo 2012; c) horario nocturno, 13 de julio 2012. Fuente: <https://www-calipso.larc.nasa.gov>



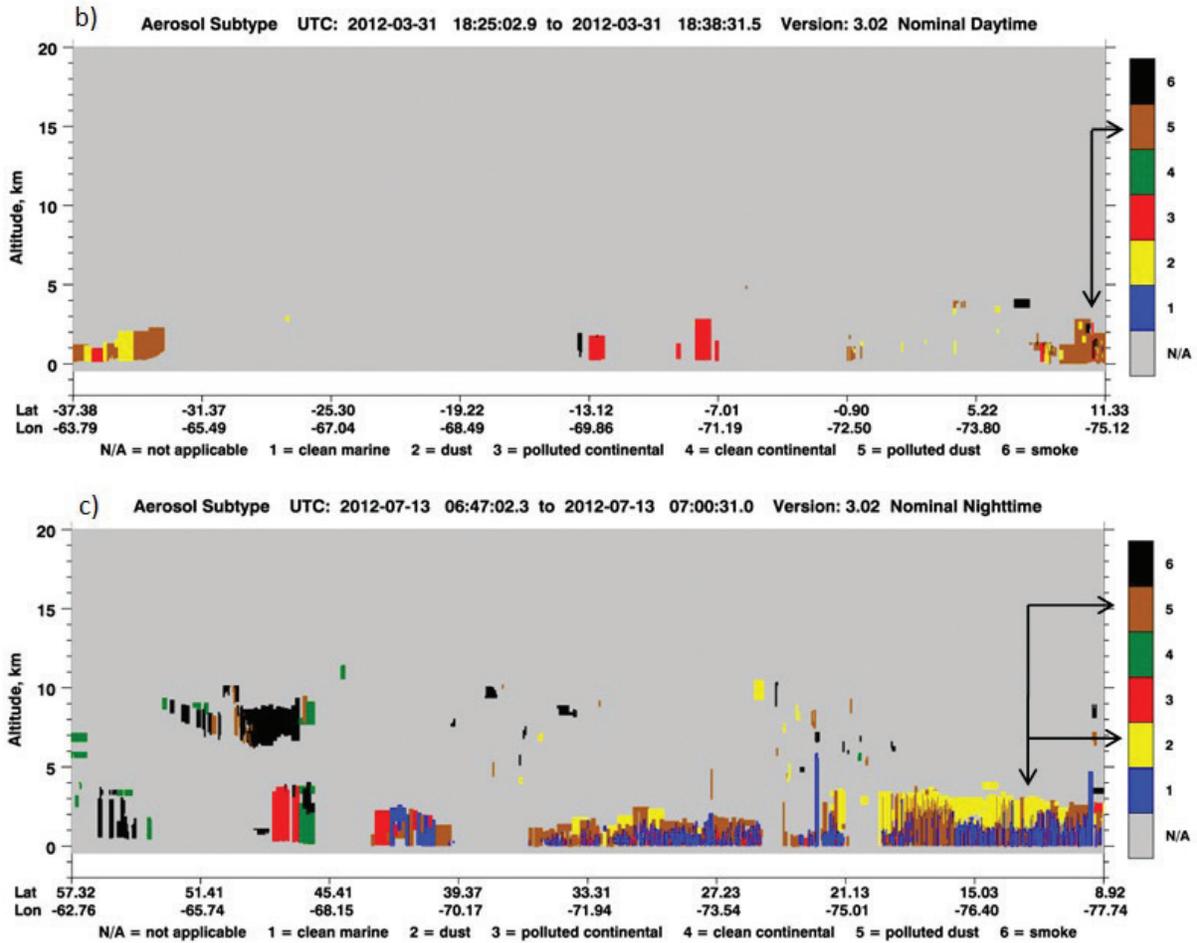


FIGURA 4. Tipo de aerosol: a) horario nocturno, 30 de marzo 2012; b) horario diurno, 31 de marzo 2012; c) horario nocturno, 13 de julio 2012. Fuente: <https://www-calipso.larc.nasa.gov>

Por último, durante los meses de octubre y noviembre no se registraron niveles de espesor óptico de polvo mayor de 0.01, lo que indica nula o muy baja presencia de este material en la atmósfera.

Modelo SKIRON

Como resultado del análisis de la concentración de polvo cerca de la superficie (*dust concentration near ground*) y teniendo en cuenta una profundidad óptica de aerosol de 532 nm y 12 UTC, con el modelo SKIRON se puede deducir que en la región Caribe colombiana se detectan varios eventos de presencia e intrusión de polvo en el año 2012, gran parte de

ellos provenientes del norte de África. En la Tabla 1 se resume el número de días por mes en los que se registraron dichos eventos.

Los resultados indican que julio, marzo, junio y agosto (con 19, 17, 17 y 13 días respectivamente) fueron los meses en los que, según este modelo, se presentaron mayores eventos de intrusión de polvo de origen africano. Sobresalen los días 4 y 29 de junio, así como los días 8, 27 y 28 de julio, cuando se registraron concentraciones de polvo cerca a la superficie entre 10 y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 5, numerales a y b). Los días restantes de estos meses registraron bajas concentraciones, es decir, entre 1 y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 5, numerales c y d). Otros días de interés

fueron el 12 y 21 de agosto, cuando el modelo registró concentraciones de polvo cerca a la superficie entre 10 y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y entre 25 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. En

enero, febrero y noviembre no se registraron eventos de intrusión, y en abril, octubre y diciembre se detectó un solo evento en cada uno de los meses.

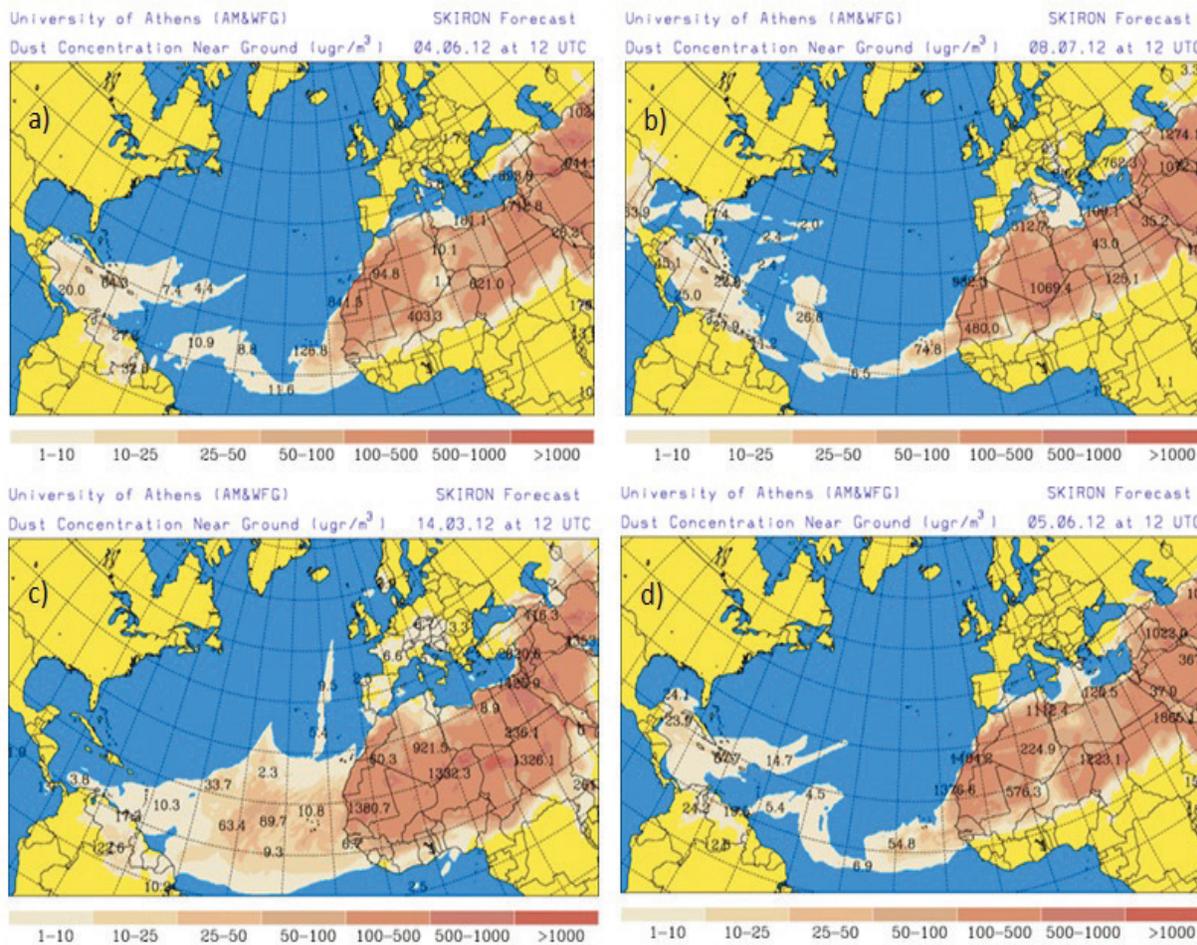


FIGURA 5. Concentración de polvo cerca de la superficie: a) y b) 10-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; c) y d) 1-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Fuente: <http://forecast.uoa.gr/>

Modelo NAAPS

Tras el análisis de la concentración de polvo en superficie (*dust surface concentration*) a 550 nm y 12 UTC con el modelo NAAPS, se evidencia que en la región Caribe se presentaron diferentes eventos de intrusión de polvo en el año 2012 proveniente del norte de África. En la Tabla 1 se resume el número de días por mes en los que se registraron dichos eventos.

Los resultados indican que marzo, enero, julio y junio (con 24, 13, 13 y 12 días respectivamente)

fueron los meses en los que se presentaron más días con presencia de polvo. En el mes de marzo sobresalen 10 días (9, 10, 15, 18, 21, 22, 28, 29, 30 y 31) en los cuales, según el modelo, se detectaron concentraciones entre 40 y 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 6, numerales a y b). En los días restantes se detectaron concentraciones entre 20 y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 6, numerales c y d). En enero se registraron únicamente concentraciones de polvo entre 20 y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En junio se registraron las mayores concentraciones

(entre 40 y 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) los días 4 y 29, mientras en julio esto ocurrió los días 27 y 28. Los días restantes

se detectaron concentraciones de polvo entre 20 y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

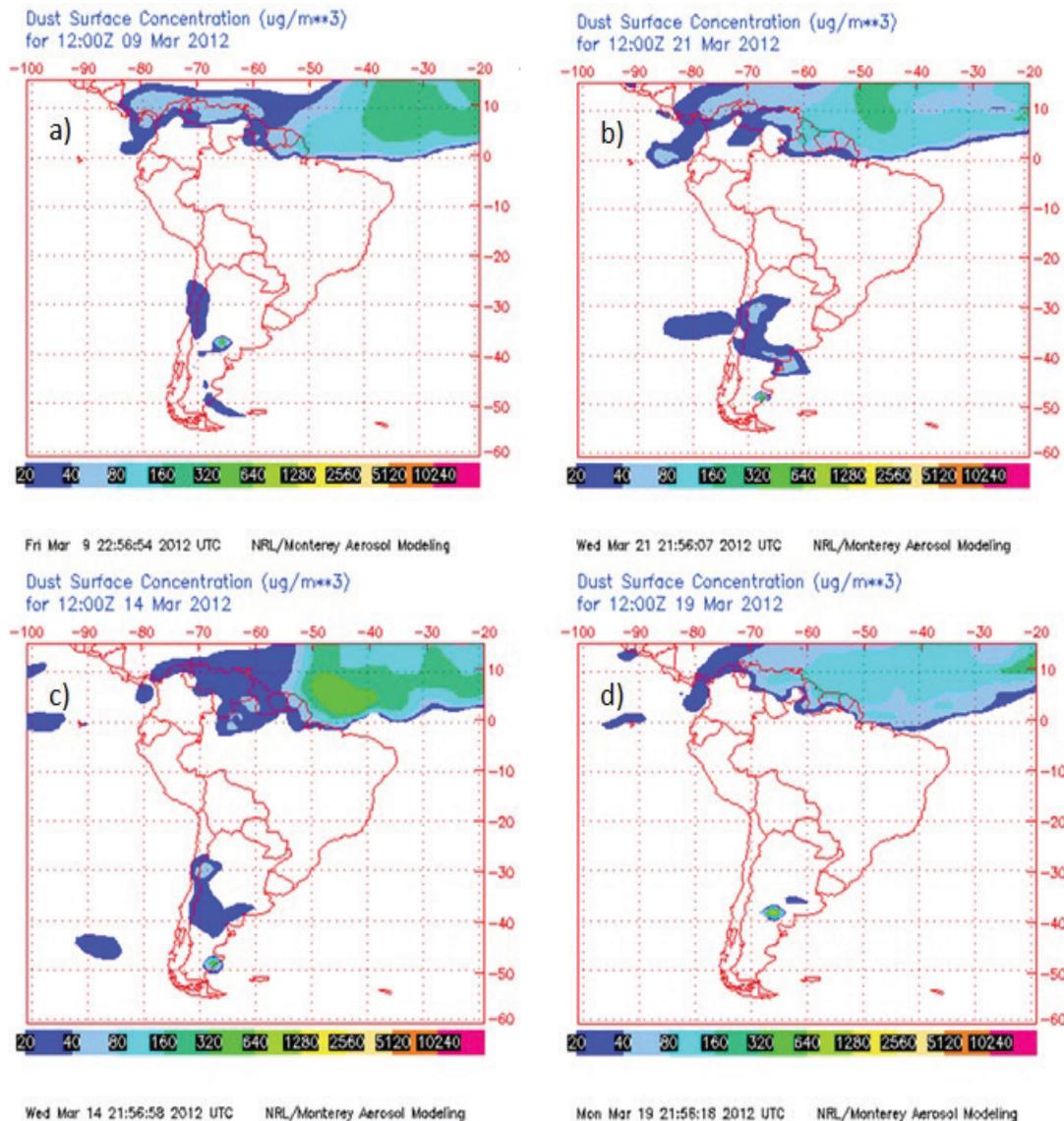


FIGURA 6. Concentración de polvo cerca de la superficie: a) y b) 40-80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; c) y d) 20-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
Fuente: <http://www.nrlmy.navy.mil/aerosol/>.

Otros días en los cuales se detectó concentración de polvo en superficie entre 40-80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ fueron el 13 de febrero y 13 de agosto. En noviembre no se registró ningún evento de intrusión, y en abril y octubre se detectó un solo evento en cada uno de los meses.

Análisis de resultados

Los resultados de los modelos GEOS-5, CALIPSO, SKIRON y NAAPS permiten deducir que en la región Caribe colombiana se detectó, para el año 2012, la existencia de eventos de intrusión de polvo de origen

africano que viajó largas distancias a través del Océano Atlántico. Dicho transporte de polvo fue registrado,

además, por los satélites TERRA y AQUA de NASA, a través del instrumento MODIS (Figura 7).

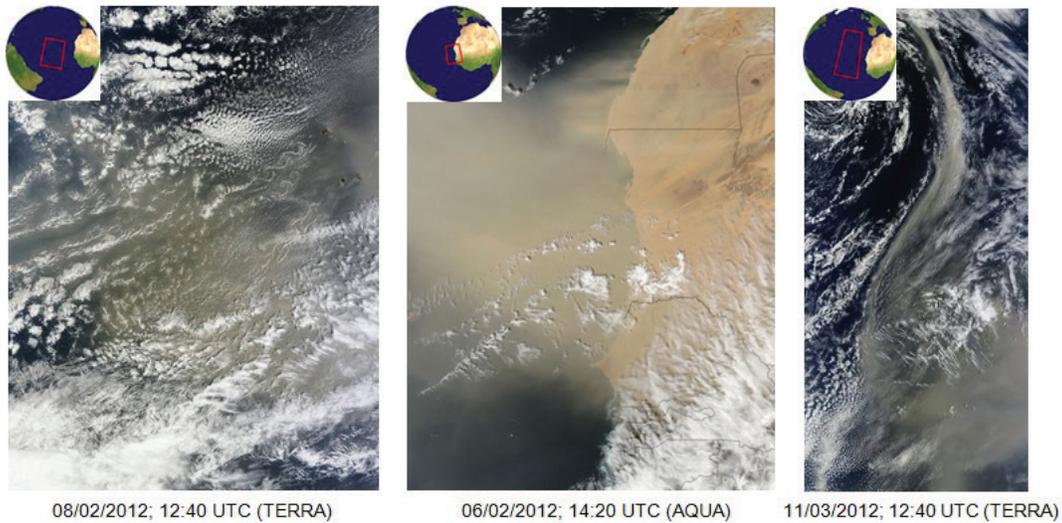


FIGURA 7. Viaje de polvo de origen africano a través del Océano Atlántico. Fuente: <https://earthdata.nasa.gov/labs/worldview>

Los modelos GEOS-5, NAAPS y SKIRON no registran exactamente la misma información, por lo que sus resultados cuantitativos no pueden contrastarse directamente. No obstante, es posible afirmar que sí hay una coincidencia en términos cualitativos, en el sentido de ofrecer información a partir de la cual es posible inferir la presencia de polvo en áreas cercanas a la superficie de la región Caribe para el año 2012.

El periodo del año en el que se presentaron mayores eventos de presencia de polvo fue entre marzo y septiembre, sobresaliendo notoriamente los meses de marzo, junio, julio y agosto. Esto se deduce tanto de los análisis del nivel de espesor óptico de polvo y de las imágenes del modelo CALIPSO, como de las concentraciones de polvo en áreas cercanas a la superficie. Esta información coincide con la presentada en el informe sobre el estado del clima titulado *State of the Climate in 2012* (Blunden y Arndt 2013) donde se evidencia, al analizar las anomalías del AOD, que una de las temporadas más activas de emisión de polvo proveniente de regiones desérticas de África, durante 2012, se presentó entre los meses de marzo y mayo. De igual forma coincide con estudios que afirman que las mayores

emisiones de polvo provenientes del norte de África se presentan durante el invierno boreal, la primavera y el verano (Ridley et al. 2012), con investigaciones que aseveran que julio es el mes donde se registran mayores eventos de intrusión de polvo africano sobre la zona tropical del Atlántico Norte (Chiappello et al. 1997) y con estudios tempranos realizados en Suramérica (Guyana Francesa) y el mar Caribe (Isla Barbados), en los cuales se concluye que las mayores concentraciones de polvo se registran en marzo y entre junio y agosto, respectivamente (Prospero y Nees 1977, Prospero et al. 1981).

Tomando en cuenta los niveles de concentración de PM_{10} reportados por las estaciones de calidad del aire Alcatrazes (Magdalena) y Cuestecitas (La Guajira), se evidencia que los mayores valores se presentan entre marzo y julio (Figura 8). El comportamiento de la concentración de PM_{10} en las dos estaciones no es igual, lo que permite advertir la alta significancia de los aportes locales en la calidad del aire de la región. No obstante, meses como marzo, junio y julio, durante los cuales se presentan concentraciones picos de PM_{10} , coinciden con el periodo de mayores niveles de emisión de polvo de África hacia el Océano Atlántico (Ridley et al. 2012).

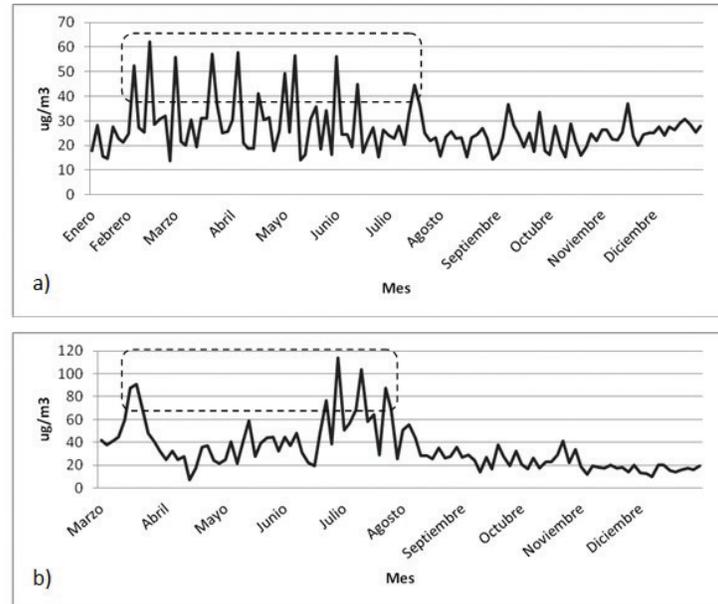


FIGURA 8. Concentración PM₁₀ (µg/m³) estaciones a) Alcatraces y b) Cuestecitas, año 2012.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de SISAIRE <http://www.sisaire.gov.co>

Ahora bien, durante los meses de mayor presencia de polvo se presentaron fenómenos sinópticos que favorecieron el ingreso de masas de aire con polvo a través del Océano Atlántico. En marzo, la influencia del sistema de alta presión (Azores), que se posiciona sobre aguas del Atlántico Este-Noroeste, formó un gradiente de presión superficial que se extendió desde el centro del Océano hasta la parte baja del mar Caribe, lo que generó fuertes vientos de dirección Noreste con velocidades entre 25 y 35 nudos (CIOH 2012a). En junio, julio y agosto, además de los procesos de “inyección” de polvo por convección térmica sobre el desierto del Sahara y su posterior transporte hacia el Suroeste a niveles altos de la atmósfera por efecto del anticiclón sobre el norte de África, se registraron tres eventos significativos: 1) una fuerte influencia del sistema de alta presión de Azores, en junio, al ubicarse al Oeste del Océano Atlántico, lo que produjo incrementos en la velocidad de los vientos; 2) el sistema de baja presión del Darién se mantuvo activo sobre la Costa Atlántica colombiana, al igual que la ZCIT, fortaleciendo el sistema de baja presión sobre el litoral colombiano; y 3) durante julio y agosto se registraron 15 eventos de ingreso de ondas tropicales desplazándose en dirección Este-Oeste por efecto de los vientos alisios (CIOH 2012b, 2012c, 2012d).

Tanto los primeros como los últimos meses del año 2012 fueron los periodos en los que se registraron menor número (o no se registraron) eventos de intrusión de polvo. Octubre y noviembre fueron los meses más representativos en este sentido. Esto concuerda con estudios que afirman que las mínimas emisiones de polvo proveniente del norte de África se presentan durante la estación de otoño (Ridley et al. 2012) y coincide con las condiciones meteorológicas registradas: ascenso del sistema de alta presión de Azores sobre los 30° N, lo que reduce la incidencia directa de los vientos alisios sobre el litoral, y no se observan procesos atmosféricos de importancia que lleven a una “inyección” de polvo desde la superficie de las zonas hacia la baja troposfera, por lo que los aportes directos de partículas desde África hacia el Océano Atlántico sólo se dan por fenómenos de tormentas de polvo locales (Viana et al. 2002).

Los dos modelos de concentración de polvo en áreas cercanas a la superficie (modelos NAAPS y SKIRON) coinciden en afirmar que los días en los que se presentaron mayores niveles de polvo en la región Caribe durante el año 2012, fueron el 4 y 29 de junio, y el 27 y 28 de julio. Si bien las concentraciones detectadas en ambos modelos no coinciden (en

NAAPS los mayores niveles registrados fueron entre 40 y 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras en SKIRON fueron entre 10 y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cualitativamente se puede inferir que en dichos días se presentaron eventos de mayor concentración con relación a los demás días del año. Esto concuerda con la información obtenida del sensor CALIPSO, con el cual, al analizar la distribución vertical de partículas en la atmósfera con una retrodispersión atenuada total de 532 nm, se registra presencia de aerosoles a nivel de superficie los primeros 2,5 Km el 4 de junio y

los primeros 3 Km el 29 de junio. Al revisar el tipo de aerosol detectado a dichas alturas se observa presencia de polvo y polvo contaminado (Figura 9, numerales a y b). De igual forma, al analizar la distribución vertical de partículas en la atmósfera para el día 28 de julio (para el día 27 de julio no hay información en los archivos CALIPSO) se registra presencia de aerosoles a nivel de superficie los primeros 3 Km. Al revisar el tipo de aerosol detectado a esta altura se observa presencia de polvo (Figura 9, numeral c).

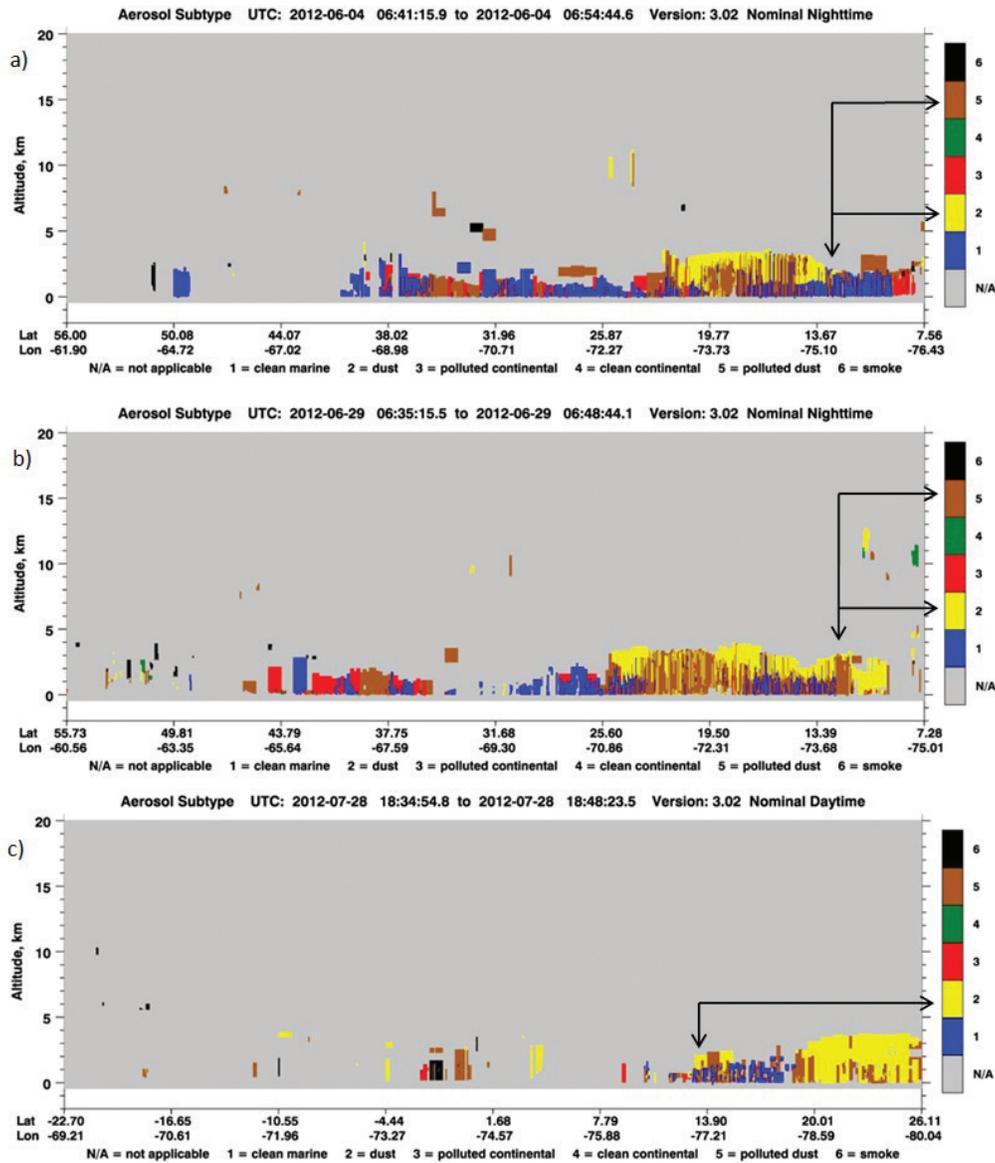


FIGURA 9. Tipo de aerosol perfil CALIPSO: a) 04 de junio; b) 29 de junio; c) 28 de julio. Fuente: <https://www-calipso.larc.nasa.gov>

Finalmente, es importante señalar que la información obtenida de los modelos utilizados no está exenta de limitaciones, algunas de las cuales son:

- i. Los valores obtenidos de AOD no siempre corresponden a una alta concentración de partículas en la superficie, porque los contaminantes podrían encontrarse a mayor altura en la atmósfera. Es decir, estos mapas representan la medida de aerosoles a lo largo de una columna vertical, con lo cual no se obtiene información acerca de la altura a la que viaja el material particulado (SERVIR 2011a). Por esta razón se acude al modelo CALIPSO, con el fin de obtener información de la distribución vertical de partículas en la atmósfera. Sin embargo, este último modelo presenta la limitante de que es poco preciso en la capa límite, es decir, aquella capa de la tropósfera contigua a la superficie de la tierra, por lo que es de mayor utilidad para mostrar el transporte de contaminantes por encima de la capa límite.
- ii. Los resultados de los modelos SKIRON y NAAPS tampoco permiten conocer la altura a la que se produce el transporte de material particulado.
- iii. Los perfiles CALIPSO registrados en horas nocturnas son más precisos que los perfiles diurnos. Esto debido a la ausencia de radiación solar, la cual puede interferir con las mediciones hechas con el equipo LIDAR. Además, la nubosidad (presente en diferentes épocas del año sobre la región Caribe) impide la medición de perfiles CALIPSO, de manera que el satélite no puede detectar aerosoles presentes en la atmósfera debajo de las nubes (SERVIR 2011b).
- iv. Es necesario considerar que los resultados obtenidos de los modelos utilizados no son medidas reales sino son generados por modelos informáticos, lo que significa que la calidad de los resultados está directamente relacionada con la calidad y el tipo de información suministrada para su procesamiento.
- v. Finalmente, los modelos utilizados manejan información meteorológica global para representar el comportamiento del material particulado en la atmósfera, lo que significa que no se tiene en

cuenta la variabilidad climática y la complejidad de fenómenos meteorológicos característicos de zonas tropicales como, por ejemplo, la influencia de la ZCIT (con sus respectivos escenarios de turbulencia dinámica y térmica), los procesos zonales de convección térmica, los movimientos del aire influenciados por causas locales como la configuración del relieve, y las extremas variaciones diurnas y nocturnas de la temperatura, humedad, presión atmosférica y los niveles de precipitación durante un mismo día (Eslava 1993).

Conclusiones

Existen evidencias para afirmar que en la región Caribe de Colombia se detectaron, para el año 2012, eventos de intrusión de polvo de origen africano. El periodo del año en el que se presentaron mayores niveles de presencia de polvo fue entre marzo y septiembre (sobresaliendo los meses de marzo, junio, julio y agosto) y en el que se registraron los menores niveles fue entre octubre y noviembre.

Los días en los que se presentaron mayores niveles de polvo a nivel de superficie en la región Caribe durante el año 2012, fueron el 4 y 29 de junio, y el 27 y 28 de julio (con concentraciones entre 10 y 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Los análisis obtenidos en este trabajo son de importancia para futuros estudios que pretendan evaluar, de forma experimental, los aportes a larga distancia de material particulado que alteran la calidad del aire de la región; su composición geoquímica; la distribución del tamaño de dicho material; la variabilidad multianual de la concentración; la relación entre la presencia de este polvo mineral y el desarrollo de fenómenos meteorológicos como la formación de ciclones y sistemas nubosos; la presencia de microorganismos de origen africano en territorio colombiano; e incluso, investigaciones que busquen relacionar eventos de enfermedades respiratorias con los periodos de mayor concentración de este contaminante atmosférico.

No obstante, para adelantar dichos estudios y obtener información más completa que permita contrastar y validar los resultados conseguidos en la presente investigación, es necesario que se ponga en marcha un programa de vigilancia continua de las

concentraciones de material particulado, especialmente de PM₁₀, en el Caribe colombiano, como parte de la

implementación de un Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire – SVCA a nivel regional.

Referencias

- Abouchami, W., Nätthe, K., Kumar, A., Galer, S., Jochum, K., Williams, E., Horbe, A., Rosa, J., Balsam, W., Adams, D., Mezger, K. y Andreae, M. 2013. "Geochemical and isotopic characterization of the Bodélé Depression dust source and implications for transatlantic dust transport to the Amazon Basin". *Earth and Planetary Science Letters* 380 (0): 112–123.
- Aguilera, M., Reina, Y., Orozco, A., Yabrudy, J. y Barcos, R. 2013. Composición de la economía de la región Caribe de Colombia. Bogotá: Banco de la República.
- Blunden, J. y Arndt, D. (Eds.). 2013. "State of the Climate in 2012". *Bulletin of the American Meteorological Society* 94 (8): S1–S238.
- Bridhikitti, A. 2013. "Atmospheric aerosol layers over Bangkok Metropolitan Region from CALIPSO observations". *Atmospheric Research* 127: 1–7.
- Chiapello, I., Bergametti, G., Chatenet, B., Bosquet, P., Dulac, F. y Santos Soares, E. 1997. "Origins of African dust transported over the northeastern tropical Atlantic". *Journal of Geophysical Research* 102 (D12): 13701 – 13709.
- CIOH - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. 2010. Climatología de los principales puertos del Caribe colombiano. Cartagena de Indias, D.T. y C. http://www.cioh.org.co/index.php/component/docman/doc_download/841-climatologia-cartagena-junio-2009. (Consultado el 17 de octubre de 2013).
- CIOH - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. 2012a. Boletín meteomarinero mensual del Caribe colombiano. Boletín No. 200, marzo de 2012.
- CIOH - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. 2012b. Boletín meteomarinero mensual del Caribe colombiano. Boletín No. 203, junio de 2012.
- CIOH - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. 2012c. Boletín meteomarinero mensual del Caribe colombiano. Boletín No. 204, julio de 2012.
- CIOH - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. 2012d. Boletín meteomarinero mensual del Caribe colombiano. Boletín No. 205, agosto de 2012.
- Cowie, G., Lawson, W. y Kim, N. 2010. "Australian dust causing respiratory disease admissions in some North Island, New Zealand Hospitals". *Journal of the New Zealand Medical Association* 123 (1311): 87–88.
- Duce, R. 1995. "Sources, distributions and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate". En *Aerosol forcing of climate*, editado por: Charlson, R. y Heintzenberg, J., 43–72. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Escudero, M., Stein, A., Draxler, R., Querol, X., Alastuey, A., Castillo, S. y Avila, A. 2011. "Source apportionment for African dust outbreaks over the Western Mediterranean using the HYSPLIT model". *Atmospheric Research* 99: 518–527.
- Eslava, J. 1993. "Climatología y diversidad climática de Colombia". *Revista académica colombiana de ciencias* XVIII (71): 507–538.
- Griffin, D. 2007. "Atmospheric movement of microorganisms in clouds of desert dust and implications for human health". *Clinical Microbiology Reviews* 20 (3): 459–477.
- Griffin, D., Garrison, V., Herman, J. y Shinn, E. 2001. African dust in the Caribbean atmosphere: microbiology and public health. *Aerobiología* 17: 203–213.
- Hogan, T. y Rosmond, T. 1991. "The description of the Navy operational global atmospheric prediction system's spectral forecast model". *Monthly Weather Review* 119: 1786–1815.

- Huang, J., Chidong, Z. y Prospero, J. 2009. "Aerosol-Induced large-scale variability in precipitation over the Tropical Atlantic". *Journal of Climate* 22: 4970-4988.
- Huneeus, N., Schulz, M., Balkanski, Y., Griesfeller, J., Prospero, J., Kinne, S., Bauer, S., Boucher, O., Chin, M., Dentener, F., Diehl, T., Easter, R., Fillmore, D., Ghan, S., Ginoux, P., Grini, A., Horowitz, L., Koch, D., Krol, M., Landing, W., Liu, X., Mahowald, N., Miller, R., Morcrette, J., Myhre, G., Penner, J., Perlwitz, J., Stier, P., Takemura, T. y Zender, C. 2011. "Global dust model intercomparison in AeroCom phase I". *Atmospheric Chemistry and Physics* 11: 7781-7816.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2007. Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia: calidad del aire. IDEAM. Bogotá.
- Kallos, G., Kotroni, V. y Lagouvardos, K. 1997. "The regional weather forecasting system SKIRON: an overview". En *Proceedings of the Symposium on regional weather prediction on parallel computer environments*, editado por Kallos, G. B., Kotroni, V. y Lagouvardos, K., 109-122. Grecia: University of Athens.
- Kallos, G., Papadopoulos, A., Katsafados, P. y Nickovic, S. 2006. "Transatlantic Saharan dust transport: model simulation and results". *Journal of Geophysical Research* 111: 1-11.
- Kellogg, C. y Griffin, D. 2006. "Aerobiology and the global transport of desert dust". *Trends in Ecology & Evolution* 21 (11): 638-644.
- Kim, D., Chin, M., Yu, H., Diehl, T., Tan, Q., Kahn, R., Tsigaridis, K., Bauer, S., Takemura, T., Pozzoli, L., Bellouin, N., Schulz, M., Peyridieu, S., Chédin, A. y Koffi, B. 2014. "Sources, sinks, and transatlantic transport of North African dust aerosol: A multi-model analysis and comparison with remote-sensing data". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119: 6259-6277.
- Kukkonen, J., Olsson, T., Schultz, D., Baklanov, A., Klein, T., Miranda, A., Monteiro, A., Hirtl, M., Tarvainen, V., Boy, M., Peuch, V., Poupkou, A., Kioutsioukis, I., Finardi, S., Sofiev, M., Sokhi, R., Lehtinen, K., Karatzas, K., San Jose, R., Astitha, M., Kallos, G., Schaap, M., Reimer, E., Jakobs, H. y Eben, K. 2012. "A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe". *Atmospheric Chemistry and Physics* 12: 1-87.
- Leventidou, E., Zanis, P., Balis, D., Giannakaki, E., Pytharoulis, I. y Amiridis, V. 2013. "Factors affecting the comparisons of planetary boundary layer height retrievals from CALIPSO, ECMWF and radiosondes over Thessaloniki, Greece". *Atmospheric Environment* 74: 360-366.
- Mészáros, E. 1999. Fundamentals of atmospheric aerosol chemistry. Budapest: Akadémiai Kiado.
- Middleton, N., Yiallourous, P., Kleanthous, S., Kolokotroni, O., Schwartz, J., Dockery, D., Demokritou, P. y Koutrakis, P. 2008. "A 10-year time-series analysis of respiratory and cardiovascular morbidity in Nicosia, Cyprus: The effect of short term changes in air pollution and dust storms". *Environmental Health* 7 (39): 1-16.
- Muhs, D., Budahn, J., Prospero, J. y Carey, S. 2009. "Geochemical evidence for African dust inputs to soils of western Atlantic islands: Barbados, the Bahamas and Florida". *Journal of Geophysical Research* (112): 1-26.
- Prospero, J., Bonatti, E., Schubert, C. y Carlson, T. 1970. "Dust in the Caribbean atmosphere traced to an African dust storm". *Earth and Planetary Science Letters* 9: 287-293.
- Prospero, J., Collard, F. y Jeannot, A. 2014. "Characterizing the annual cycle of African dust transport to the Caribbean Basin and South America and its impact on the environment and air quality". *Global Biogeochemical Cycles* 29: 757-773.
- Prospero, J., Glaccum, R. y Nees, R. 1981. "Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America". *Nature* 289: 570 - 572.
- Prospero, J. y Lamb, P. 2003. "African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications". *Science* 302 (5647): 1024-1027.

- Prospero, J. y Nees, R. 1977. "Dust concentration in the atmosphere of the Equatorial North Atlantic: Possible relationship to the Sahelian drought". *Science* 196: 1196-1198.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Plana, F., Ruiz, C., Cots, N., Massagué, G. y Puig, O. 2001. "PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan Area, Catalonia, Spain". *Atmospheric Environment* 35 (36): 6407-6419.
- Reale, O., Lau, W., Kim, K. y Brin, E. 2009. "Atlantic tropical cyclogenetic processes during SOP-3 NAMMA in the GEOS-5 global data assimilation and forecast system". *Journal of the Atmospheric Sciences* 66: 3563-3578.
- Ridley, D., Heald, C. y Ford, B. 2012. "North African dust export and deposition: a satellite and model perspective". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117: 1-21.
- Sánchez de la Campa, A., Moreno, T., De la Rosa, J., Alastuey, A. y Querol, X. 2011. "Size distribution and chemical composition of metalliferous stack emissions in the San Roque petroleum refinery complex, southern Spain". *Journal of Hazardous Materials* 190: 713-722.
- Sassen, K., DeMott, P., Prospero, J. y Poello, M. 2003. "Saharan dust storms and indirect aerosol effects on clouds: CRYSTAL-FACE results". *Geophysical Research Letters* 30 (12): 1633.
- Schulz, M., Prospero, J., Baker, A., Dentener, F., Ickes, L., Liss, P., Mahowald, N., Nickovic, S., García-Pando, C., Rodríguez, S., Sarin, M., Tegen, I. y Duce, R. 2012. "Atmospheric transport and deposition of mineral dust to the ocean: implications for research needs". *Environmental Science & Technology* 46: 10390-10404.
- SERVIR - Sistema Regional de Visualización y Monitoreo de Mesoamérica. 2011a. Aerosol Optical Depth (AOD). http://www.servir.net/en/aerosol_optical_depth_aod. (Consultado el 13 de septiembre de 2013).
- SERVIR - Sistema Regional de Visualización y Monitoreo de Mesoamérica. 2011b. CALIPSO. <http://www.servir.net/CALIPSO>. (Consultado el 13 de septiembre de 2013).
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. y Miller, H. 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Reino Unido y Nueva York: Cambridge University Press.
- Suarez, M. 2012. The GEOS-5 Atmospheric general circulation model: mean climate and development from MERRA to Fortuna. Technical report series on global modeling and data assimilation, v. 27.
- Swap, R., Ulanski, S., Cobbett, M. y Garstang, M. 1996. "Temporal and spatial characteristics of Saharan dust outbreaks". *Journal of Geophysical Research* 101: 4205-4220.
- Trapp, J., Millero, F. y Prospero, J. 2010. "Temporal variability of the elemental composition of African dust measured in trade wind aerosols at Barbados and Miami". *Marine Chemistry* 120: 71-82.
- Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Cuevas, E. y Rodríguez, S. 2002. "Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network". *Atmospheric Environment* 36: 5861-5875.
- Winker, D., Hunt, W. y Hostetler, C. 2004. "Status and performance of the CALIOP lidar". *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation* 5575: 8-15.
- Winker, D., Pelon, J. y McCormick, M. 2003. "The CALIPSO mission: space borne lidar for observation of aerosols and clouds". *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation* 4893: 1-11.
- Yamaguchi, N., Ichijo, T., Sakotani, A., Baba, T. y Nasu, M. 2012. "Global dispersion of bacterial cells on Asian dust". *Scientific Reports* 2: 525.
- Yasunari, T., Koster, R., Lau, K., Aoki, T., Sud, Y., Yamazaki, T., Motoyoshi, H. y Kodama, Y. 2011. "Influence of dust and black carbon on the snow albedo in the NASA Goddard Earth Observing System version 5 land surface model". *Journal of Geophysical Research* 116, D02210.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a los profesores Dr. Jesús de la Rosa y Dra. Ana Sánchez de la Campa, de la Universidad de Huelva (España), por sus aportes y su orientación en la realización de la investigación a partir de la cual se realizó el presente artículo. Asimismo agradece a los profesores George Kallos y Christos Spyrou, de la Universidad de Atenas (Grecia), por facilitar la información del modelo SKIRON para este estudio.

De igual forma agradece a la Universidad Internacional de Andalucía (España) por la beca otorgada durante el periodo 2012/2013.