

# Origen de masas de aire en cuatro ciudades de Colombia mediante el modelo HYSPLIT

## Origin of air masses in four Colombian cities using HYSPLIT model

### *Origem das massas de ar em quatro cidades na Colômbia por modelo HYSPLIT*

**Omar Javier Ramírez Hernández.**

Ingeniero Ambiental y Sanitario Máster (C) en Tecnología Ambiental  
Universidad Internacional de Andalucía. Universidad de Huelva

omarjrh@yahoo.com

#### **Resumen**

El objetivo de esta investigación fue identificar los orígenes de las masas de aire en cuatro ciudades colombianas (Bogotá, Cartagena de Indias, Pasto y Leticia) que tienen el potencial de afectar la calidad del aire urbano al transportar material particulado a largas distancias desde diferentes puntos geográficos. Metodológicamente se utilizó información proporcionada por el modelo HYSPLIT versión 4, con el cual se midieron retro-trayectorias para un periodo de análisis de un año (desde el 01 de enero a 31 de diciembre de 2012). El cálculo de retrotrayectorias es de gran utilidad para determinar la zona de partida de las masas de aire que llegan en un momento determinado, a un lugar concreto y a una altura definida. De esta forma se obtuvieron retro-trayectorias diarias registradas a las 12:00 UTC (tiempo universal coordinado), con cálculos a intervalos de seis horas, representando el transporte realizado por la masa de aire los cinco días anteriores (120 h). Las alturas isentrópicas consideradas fueron de 750, 1500 y 2500 m medidas desde el nivel del suelo. Según los resultados obtenidos, el origen de masas de aire más frecuente en Cartagena de Indias durante 2012 fue Caribe (45%), seguido por Continental (36%). En Bogotá fue Continental

(77%), seguido por Atlántico Este (19%). En Pasto fue Pacífico (72%), seguido por Continental (23%). Y en Leticia fue Continental (99%) seguido por el origen Atlántico Este (1%).

**Palabras clave:** calidad del aire, meteorología, modelación atmosférica, retro-trayectorias, transporte de contaminantes.

#### **Abstract**

The objective of this research it was to identify the origins of air masses in four cities in Colombia (Bogota, Cartagena de Indias, Pasto and Leticia) that have the potential to affect the urban air quality when transporting particulated material long distances from different geographic locations. Methodologically information provided was used by the Hysplit model version 4, with which retro-trajectories were measured for a period of analysis of a year (from January 01 to December 31, 2012). The calculation of retro-trajectories is very useful to determine the area of departure of the air masses that arrive at a particular time, in a specific place, and at a defined height. In this way daily retro-trajectories were obtained, registered at 12:00 UTC (Coordinated Universal Time), with

calculations at intervals of six hours, representing the carriage performed by the mass of air the past five days (120 h). The isentropic heights considered were 750, 1500 and 2500 m measures from the ground level. According to the results obtained, the origin of air masses more frequent in Cartagena de Indias during 2012 was Caribbean (45 %), followed by Continental (36 %). In Bogotá, it was Continental (77 %), followed by Eastern Atlantic (19 %). In Pasto, it was Pacific (72 %), followed by Continental (23 %). And in Leticia, it was Continental (99 %) followed by the origin, east Atlantic (1 %).

**Key-words:** air quality, meteorology, atmospheric modeling, retro-trajectories, transport of pollutants.

## Resumo

O objetivo deste trabalho é identificar as origens das massas de ar em quatro cidades colombianas (Bogotá, Cartagena, Pasto e Leticia), que têm o potencial de afetar a qualidade do ar urbano ao transportar material particulado por longas distâncias a partir de diferentes localizações geográficas. Metodologicamente foi usada informação fornecida pela HYSPLIT versão 4, com

o qual foram medidas retro- trajetórias por um período de análise de um ano (de 1 de Janeiro a 31 de dezembro de 2012). O cálculo das trajetórias é muito útil para determinar a localização do início das massas de ar que chegam em um momento particular em um lugar especial em uma altura definida. Assim obtiveram-se retro-trajetórias registrados diariamente às 12:00 UTC (Tempo Universal Coordenado), com estimativas em intervalos de seis horas, o que representa o transporte de massa por via aérea, cinco dias antes (120 h). As alturas isentrópicas consideradas foram 750, os passos 1500 e 2500 m calculadas a partir do nível do solo. De acordo com os resultados, a origem das massas de ar mais frequentemente em Cartagena das Índias em 2012 foi Caribe (45%), seguida pela Continental (36%). Em Bogotá foi continental (77%), seguido por Atlântica este (19%). Em Pasto Pacífico (72%) foi seguido por Continental (23%). E Leticia foi continental (99%), seguido por a origem do Atlântico Médio (1%).

**Palavras-chave:** qualidade do ar, meteorologia, modelagem atmosférica, retro trajetórias, transporte de contaminantes.

## Introducción

El material particulado, especialmente las partículas más finas ( $PM_{2.5}$ ), constituye el contaminante atmosférico más importante que perjudica la salud humana (Carnelley & Le, 2001; WHO, 2011). Investigaciones internacionales revelan que no existe un umbral de exposición seguro, ya que incluso niveles muy bajos pueden afectar la salud de la población expuesta (WHO, 1999; 2006). Los efectos están asociados predominantemente con trastornos respiratorios (Cowie, Lawson & Kim., 2010) y cardiovasculares (Middleton *et al.*, 2008), pero la gama de efectos es amplia tanto para la exposición aguda como crónica.

Año tras año diferentes estudios reportan los crecientes niveles de concentración de material particulado en contextos urbanos (Weber, 2009; Merbitz, Fritz & Schneider, 2012). Gran parte de las fuentes generadoras de dicho contaminante se localizan dentro del propio perímetro de las ciudades, pero hay estudios que evidencian el aporte de material particulado a larga distancia (especialmente de fracciones finas) que incide en los niveles de calidad del aire (Pongkiatkul & Kim, 2007; Stefan, Necula & Georgescu, 2010; Wagstrom & Pandis, 2011; Tang *et al.*, 2014). Esta situación es llamativa y señala la importancia de estudiar los procesos de transporte de material particulado a través de masas de aire.

El presente artículo avanza en dicho sentido y, por medio de la obtención y análisis de retrotrayectorias, identifica el origen de masas de aire para diferentes ciudades de Colombia. El cálculo de retrotrayectorias es de gran utilidad ya que representa el recorrido previo realizado por una masa de aire antes de incidir sobre un área determinada. Esto significa que por medio de las retrotrayectorias se puede determinar la zona de partida y el recorrido de las masas de aire que arriban a ciudades y zonas de interés (Boian & Kirchoff, 2004), lo cual permite analizar los aportes externos de material particulado. Su uso es ampliamente utilizado en trabajos científicos, de tal forma que algunos autores recurren a las retrotrayectorias para detectar el transporte a larga distancia de masas de aire contaminadas que pueden tener un impacto sobre los niveles de concentración de  $PM_{10}$  (Salvador, Artinano, Querol & Alastuey, 2008), para describir procesos atmosféricos a nivel de tropósfera (Jorba, Pérez, Roca-denbosch & Baldasano, 2004), para caracterizar tendencias espaciales y temporales de contaminantes (Coury & Dillner, 2007) y, en general, para interpretar el origen y transporte de contaminantes atmosféricos (Vardoulakis & Kassomenos, 2008).

De esta forma, el principal objetivo de este estudio es identificar los orígenes de las masas de aire en cuatro ciudades colombianas (Bogotá, Cartagena de Indias, Pasto y Leticia) que tienen el potencial de afectar la calidad del aire urbano al transportar material particulado a largas distancias.

## Materiales y métodos

Para identificar el origen de las masas de aire se calcularon y analizaron retrotrayectorias (o trayectorias inversas) tridimensionales utilizando el modelo HYSPLIT (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*), versión 4, del Laboratorio de Recursos Atmosféricos (*Air Resources Laboratory – ARL*) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*National Atmospheric and Oceanic Administration – NOAA*) de

Estados Unidos (Draxler & Hess, 1998). Se seleccionó este modelo por ser ampliamente utilizado en investigaciones científicas a nivel internacional (Viana, Querol, Alastuey, Cuevas & Rodríguez., 2002; Artinano, Salvador, Alonso, Querol & Alastuey, 2003; Kedia & Ramachandran, 2008; Uno *et al.*, 2009; Davis *et al.*, 2010; Escudero *et al.*, 2011).

Este modelo toma como base meteorológica los archivos GDAS 2006-2013 (*Global Data Assimilation System*) de la *National Weather Service's National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), tiene una resolución espacial de 100 km x 100 km alrededor del punto indicado y su método de cálculo es un híbrido entre el enfoque lagrangiano, que se caracteriza por hacer uso de un sistema de referencia que se ajusta al movimiento atmosférico, y el enfoque euleriano, en el cual las ecuaciones que describen el movimiento en la atmósfera se resuelven considerando un sistema fijo de coordenadas y la región a modelar se divide en celdas o cajas, tanto horizontal como verticalmente. El modelo realiza el cálculo de advección y difusión en un marco lagrangiano, mientras que para la concentración de elementos utiliza un marco euleriano (Draxler & Hess, 1998; González, 2009). Para una descripción detallada de las características generales del modelo se recomienda consultar Draxler & Hess (1997), Draxler & Hess (1998) y Draxler (1999).

Para el presente estudio se utilizó la versión *online* de HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/hypubbin/trajasrc.pl>) y se obtuvieron retrotrayectorias diarias, durante todo el año 2012, a las 12:00 UTC, con cálculos a intervalos de seis horas, representando el transporte realizado por la masa de aire los cinco días anteriores (120 h). Las alturas isentrópicas consideradas fueron de 750, 1.500 y 2.500 m medidas desde el nivel del suelo.

La altura de 750 m se seleccionó con el fin de tener una referencia de incidencia dentro de la capa límite, la cual está influenciada por las emisiones antropogénicas. Las alturas de 1500 m y 2500 m se eligieron para analizar el comportamiento de

las masas de aire en la zona superior de la capa límite y en la tropósfera libre, respectivamente. Por último, la duración de los cálculos de cinco días se seleccionó porque permite conocer el desplazamiento de las masas de aire con un origen sinóptico.

El modelo HYSPLIT se utilizó para identificar y analizar los orígenes de masas de aire predominantes en cuatro ciudades colombianas, lo cual permite

reconocer la variación de las masas de aire en cuatro diferentes regiones naturales del país (Figura 1):

- Cartagena de Indias (Región Caribe): (10°N, 75°O).
- Bogotá (Región Andina): (5°N, 74°O).
- Pasto (Región Pacífica): (2°N, 78°O).
- Leticia (Región Amazonía): (2°S, 70°O).

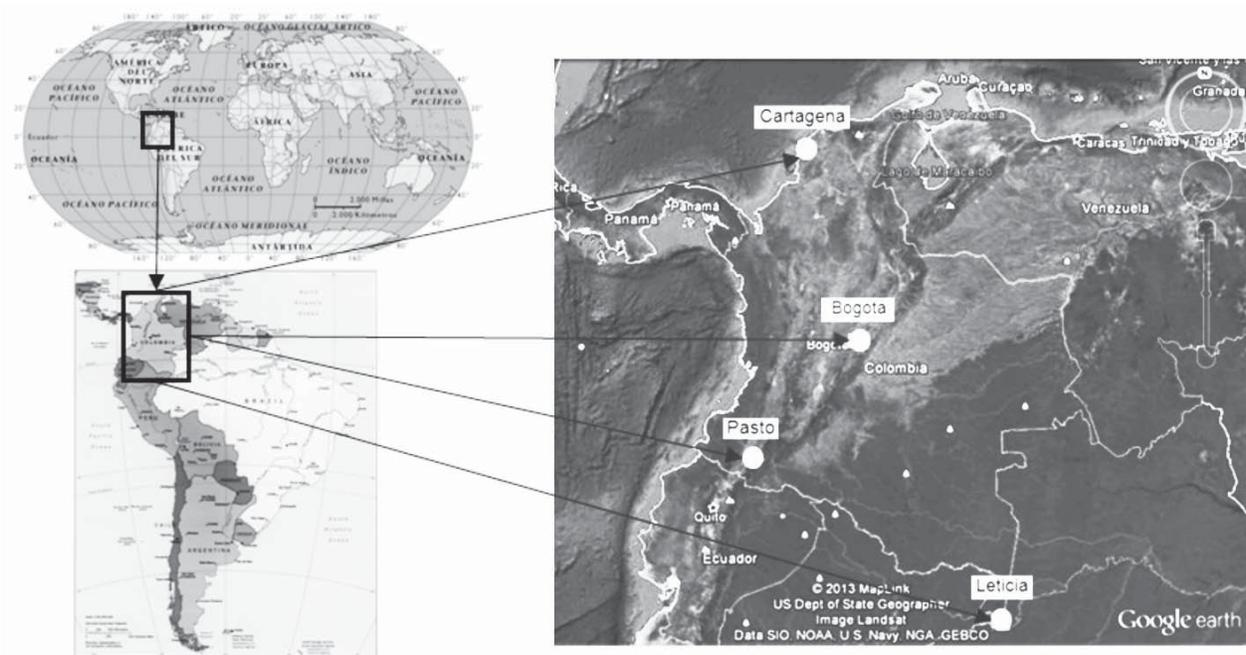


Figura 1. Localización de las ciudades objeto de estudio

En total se obtuvieron 1.464 mapas de retro trayectorias (366 de cada ciudad) entre el 01 de enero y el 31 de diciembre de 2012. Los orígenes que se identificaron para este estudio se encuentran esquematizados en la Figura 2 y se describen a continuación:

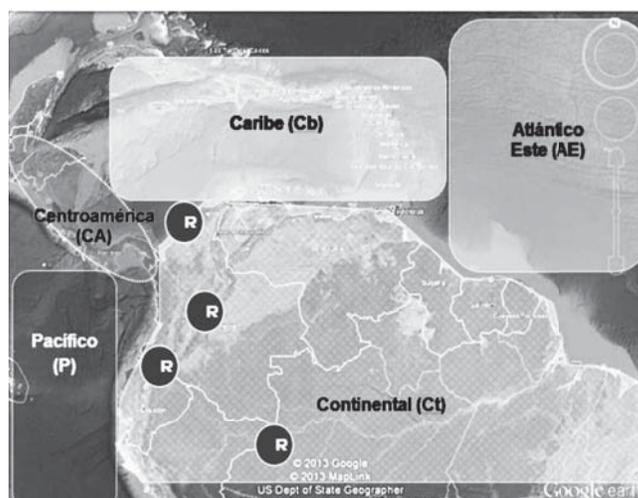


Figura 2. Sectores definidos para la identificación de masas de aire

- Caribe (Cb): masas de aire provenientes del mar Caribe y el arco antillano.
- Atlántico Este (AE): masas de aire provenientes del océano Atlántico Este y Noreste.
- Continental (Ct): masas de aire provenientes de áreas continentales.
- Pacífico (P): masas de aire provenientes del océano Pacífico.
- Centroamérica (CA): masas de aire provenientes de países centroamericanos.
- Regional (R): masas de aire de recirculación regional.

El criterio utilizado para definir el origen predominante de la masa de aire en un determinado día fue el tiempo de residencia de la masa de aire en cada una de las seis zonas definidas en la Figura 2.

En los días en los que las retrotrayectorias a las tres alturas consideradas diferían drásticamente entre sí, se priorizó el análisis a 750 m sobre el nivel del suelo, teniendo en cuenta que es la de mayor relevancia en términos de calidad del aire.

## Resultados y discusión

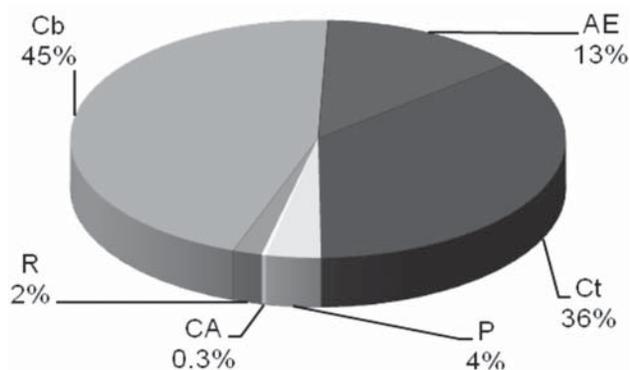
### Cartagena de Indias (Región Caribe)

En la Tabla 1 se resume el número de días por mes, de predominancia de los orígenes de masas de aire en Cartagena de Indias, la frecuencia de días al año de presencia de cada uno de los orígenes y su respectivo porcentaje. En la Figura 3 se representan dichos porcentajes para el año 2012.

**Tabla 1.** Origen de masas de aire en Cartagena de Indias durante el año 2012 (número de días al mes)

| Mes          | Tipo de origen |           |            |           |            |          |
|--------------|----------------|-----------|------------|-----------|------------|----------|
|              | Cb             | AE        | Ct         | P         | CA         | R        |
| Enero        | 17             | 14        | 0          | 0         | 0          | 0        |
| Febrero      | 18             | 9         | 2          | 0         | 0          | 0        |
| Marzo        | 7              | 9         | 15         | 0         | 0          | 0        |
| Abril        | 19             | 1         | 8          | 0         | 0          | 2        |
| Mayo         | 9              | 2         | 19         | 0         | 1          | 0        |
| Junio        | 1              | 2         | 23         | 0         | 0          | 4        |
| Julio        | 9              | 4         | 18         | 0         | 0          | 0        |
| Agosto       | 14             | 0         | 16         | 1         | 0          | 0        |
| Septiembre   | 9              | 0         | 21         | 0         | 0          | 0        |
| Octubre      | 14             | 0         | 4          | 12        | 0          | 1        |
| Noviembre    | 24             | 3         | 3          | 0         | 0          | 0        |
| Diciembre    | 24             | 5         | 2          | 0         | 0          | 0        |
| <b>Total</b> | <b>165</b>     | <b>49</b> | <b>131</b> | <b>13</b> | <b>1</b>   | <b>7</b> |
| <b>%</b>     | <b>45</b>      | <b>13</b> | <b>36</b>  | <b>4</b>  | <b>0.3</b> | <b>2</b> |

Cb: Caribe; AE: Atlántico Este; Ct: Continental;  
 P: Pacífico; CA: Centroamérica; R: Regional

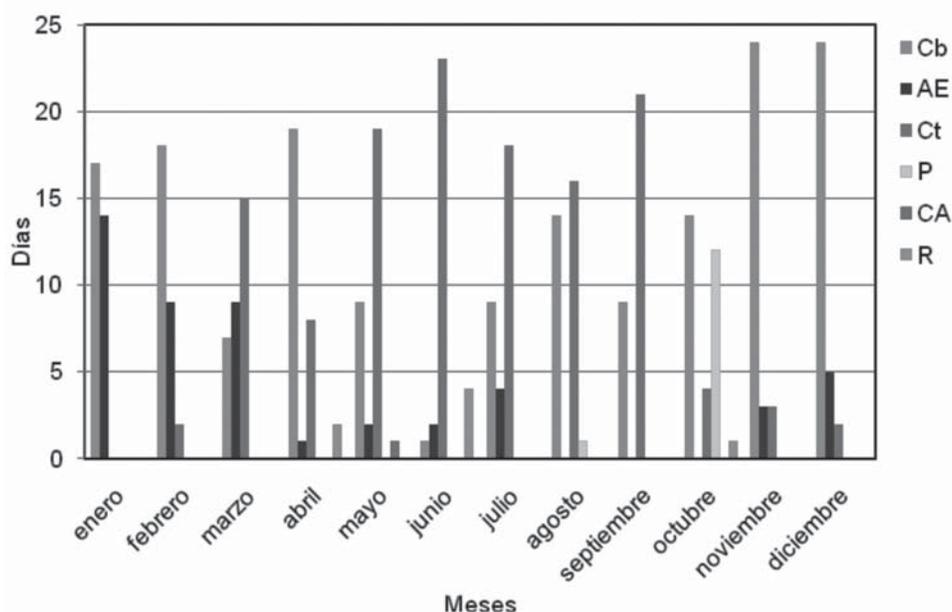


**Figura 3.** Frecuencia en porcentaje de orígenes de masas de aire en Cartagena de Indias durante el año 2012

De los resultados obtenidos se puede observar que el origen de masas de aire más frecuente en Cartagena de Indias es Cb (45%), seguido por

Ct (36%) y AE (13%). En menor medida se encuentran los orígenes P (4%), R (2%) y CA (0.3%).

La mayor frecuencia de masas de aire de origen Cb (predominante en esta ciudad) se presentó en los meses de noviembre y diciembre (24 días para ambos), seguido de abril, febrero y enero (19, 18 y 17 días respectivamente). Los días de menor predominancia de masa de aire de origen Cb se presentaron en junio y marzo (1 y 7 días respectivamente), meses en los cuales prevaleció el origen Ct (Figura 4). Esto significa que el origen de masas Cb predominó tanto en los primeros meses (enero y febrero) como en los últimos del año (noviembre y diciembre), mientras que el origen de masas Ct predominó a mediados del año (de mayo a septiembre).



**Figura 4.** Distribución mensual de orígenes de masas de aire en Cartagena de Indias durante el año 2012

Si bien las masas de aire de esta ciudad presentan una predominancia de origen Cb, antes de arribar recorren (a 750, 1500 y 2500 m) áreas continentales del Norte venezolano (estados de Zulia, Falcón, Lara, Trujillo y Yaracuy, particularmente) y del Norte colombiano (departamentos de Guajira, Cesar y Magdalena) (Figura 5).

De igual forma es importante resaltar que la predominancia del origen Cb está fuertemente influenciada por el tiempo considerado para la modelización del estudio (120 h), pero tal como se observa en la Figura 5, estas masas provienen, predominantemente, de dirección Noreste, es decir, del océano Atlántico.

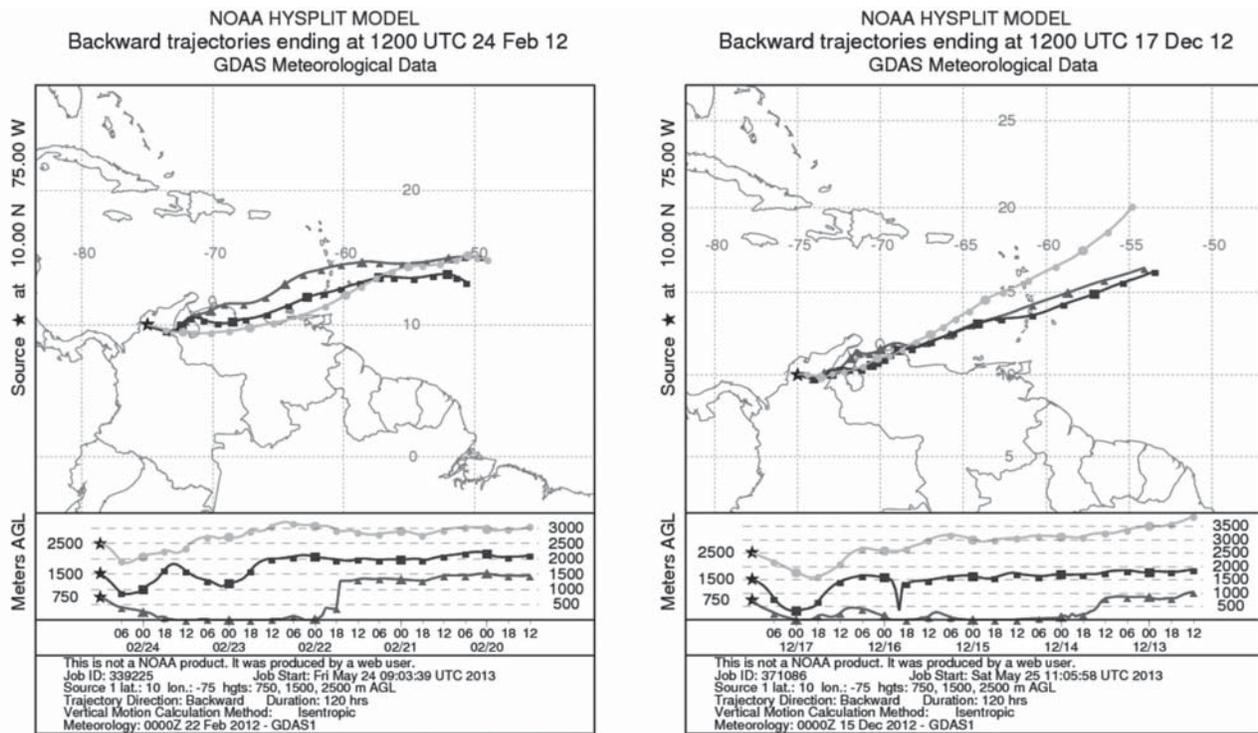


Figura 5. Recorrido continental de masas de aire de origen Cb (Cartagena de indias)

Por otro lado, los días en que prevaleció el origen Ct, las masas de aire provinieron, en mayor medida, del Norte y región central de Venezuela, del Norte de Brasil y del Este colombiano (Figura 6).

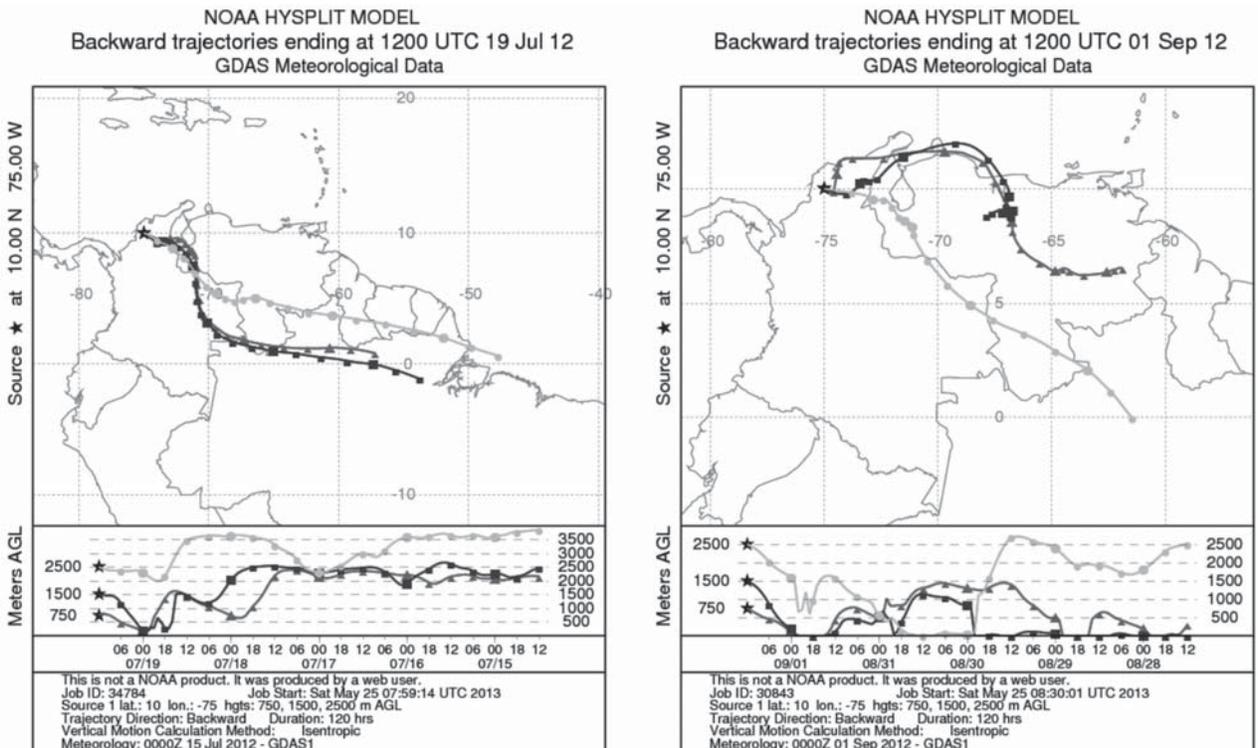


Figura 6. Recorrido de las masas de aire de origen Ct (Cartagena de Indias)

Las anteriores características tienen relevancia a la hora de analizar los aportes de material particulado transportado a largas distancias por las masas de aire, incluyendo eventos de intrusión de polvo de origen africano y material particulado proveniente de incendios forestales y quema de biomasa a nivel regional, lo cual incide en la calidad del aire de la ciudad.

Octubre, desde mediados hasta los últimos días, fue el único mes del año en que se identificó una leve predominancia del origen P (12 días), ya que las masas de aire (a 750, 1500 y 2500 m) provinieron del Océano Pacífico (Figura 7). Tan sólo un día en el mes de mayo se identificó origen de tipo CA, por lo que no resulta de interés para los efectos de este estudio.

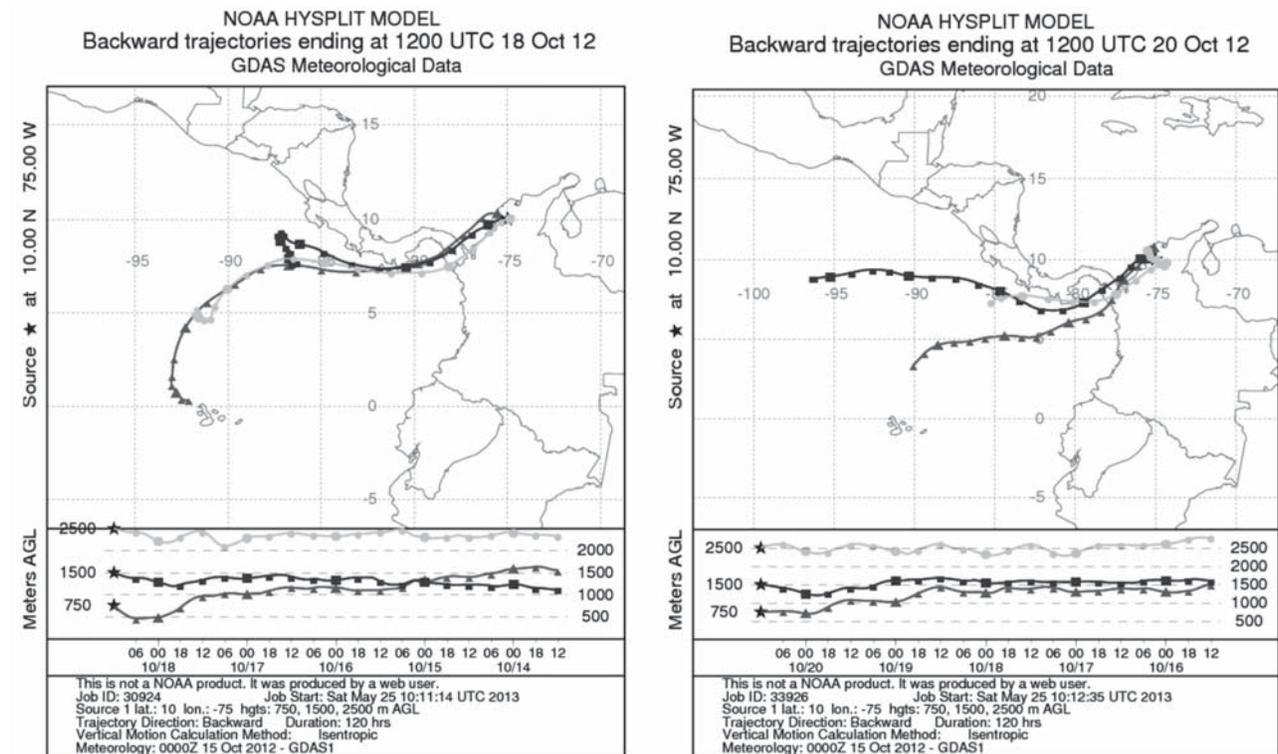


Figura 7. Recorrido de las masas de aire de origen P (Cartagena de Indias)

### Bogotá (Región Andina)

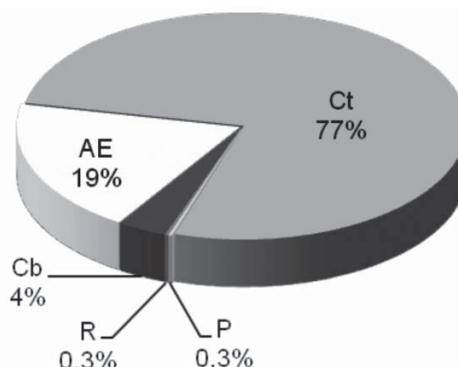
En la Tabla 2 se resume el número de días por mes de predominancia de los orígenes de masas de aire en Bogotá, el total de días anual de presencia

de cada uno de los orígenes de masa de aire y su respectivo porcentaje. En la Figura 8 se representan dichos porcentajes para el año 2012.

**Tabla 2.** Origen de masas de aire en Bogotá durante el año 2012 (número de días al mes)

| Mes          | Tipo de origen |           |            |            |          |            |
|--------------|----------------|-----------|------------|------------|----------|------------|
|              | Cb             | AE        | Ct         | P          | CA       | R          |
| Enero        | 4              | 8         | 19         | 0          | 0        | 0          |
| Febrero      | 4              | 14        | 11         | 0          | 0        | 0          |
| Marzo        | 0              | 7         | 24         | 0          | 0        | 0          |
| Abril        | 2              | 2         | 25         | 0          | 0        | 1          |
| Mayo         | 0              | 4         | 27         | 0          | 0        | 0          |
| Junio        | 0              | 5         | 25         | 0          | 0        | 0          |
| Julio        | 0              | 6         | 25         | 0          | 0        | 0          |
| Agosto       | 0              | 1         | 30         | 0          | 0        | 0          |
| Septiembre   | 0              | 1         | 29         | 0          | 0        | 0          |
| Octubre      | 0              | 2         | 28         | 1          | 0        | 0          |
| Noviembre    | 0              | 8         | 22         | 0          | 0        | 0          |
| Diciembre    | 3              | 12        | 16         | 0          | 0        | 0          |
| <b>Total</b> | <b>13</b>      | <b>70</b> | <b>281</b> | <b>1</b>   | <b>0</b> | <b>1</b>   |
| <b>%</b>     | <b>4</b>       | <b>19</b> | <b>77</b>  | <b>0.3</b> | <b>0</b> | <b>0.3</b> |

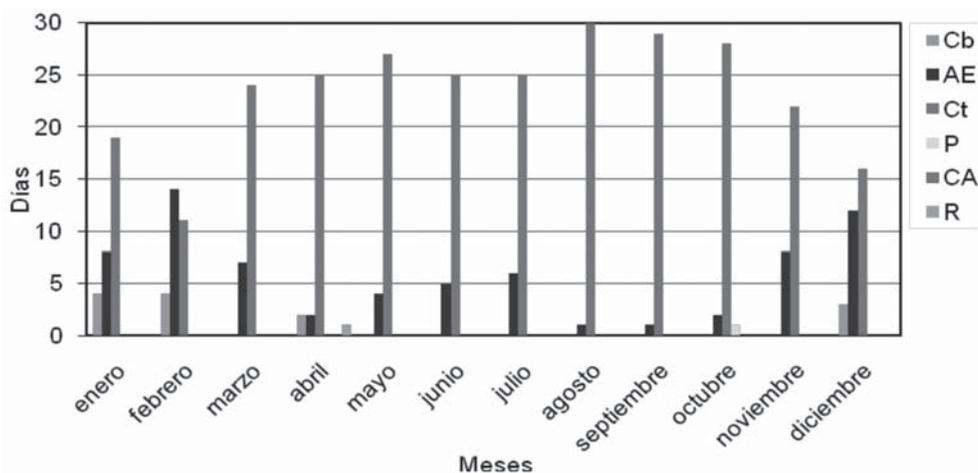
Cb: Caribe; AE: Atlántico Este; Ct: Continental; P: Pacífico; CA: Centroamérica; R: Regional



**Figura 8.** Frecuencia en porcentaje de orígenes de masas de aire en Bogotá durante el año 2012

Como se puede observar de los resultados obtenidos, el origen de masas de aire más frecuente en Bogotá fue Ct (77%), seguido por AE (19%). En menor medida se encuentran los orígenes Cb, P y R con valores de 4, 0.3 y 0.3% respectivamente. Ningún día se detectaron masas de aire de origen CA.

La mayor frecuencia del origen Ct (predominante en esta ciudad) fue en el mes de agosto (30 días), seguido de septiembre, octubre y mayo (29, 28 y 27 días respectivamente). Los días de menor predominancia de masa de aire de origen Ct se presentaron en febrero (11 días), mes en el cual prevaleció el origen AE. Esto significa que el origen de masas Ct predominó durante todos los meses del año, a excepción del mes de febrero (Figura 9).



**Figura 9.** Distribución mensual de orígenes de masas de aire en Bogotá durante el año 2012

Durante todo el año las masas de aire de origen Ct provinieron, principalmente, del Noroeste, Este y zona central de Venezuela (Figura 10). No obstante en agosto, septiembre y octubre se presentaron, de forma reiterada, masas de aire provenientes del Norte de Brasil (Figura 11). Esto

resulta de gran interés en el análisis de los aportes contaminantes que recibe y transporta las masas de aire, incluyendo material particulado atmosférico (hollín) proveniente, por ejemplo, de incendios forestales y quema de biomasa en escenarios agrícolas.

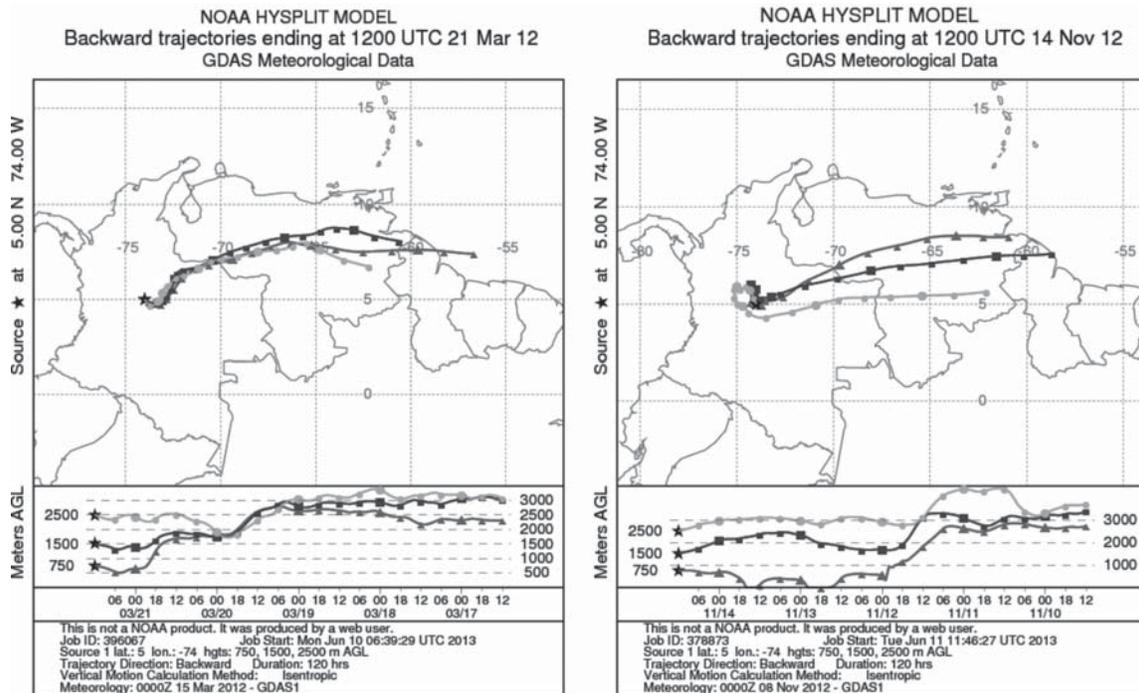


Figura 10. Masas de aire de Bogotá, origen Ct (Venezuela)

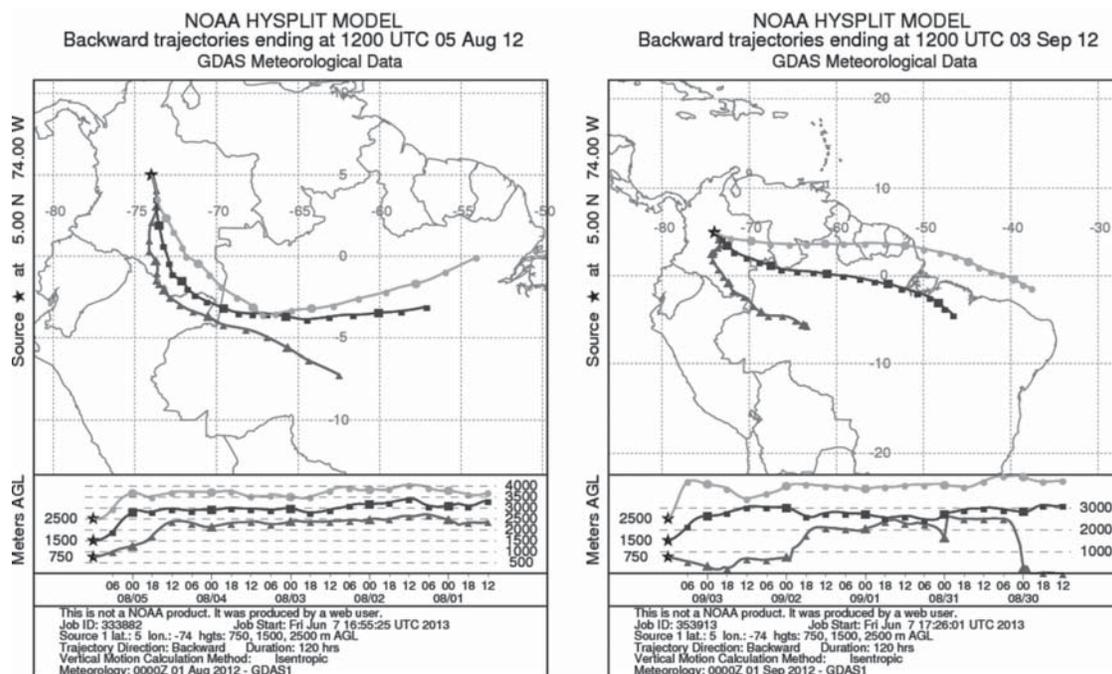


Figura 11. Masas de aire de Bogotá, origen Ct (Brasil)

Tan sólo un día en el mes de octubre y un día en abril se identificaron origen de tipo P y R, por lo que no resultan de interés para los efectos de este estudio.

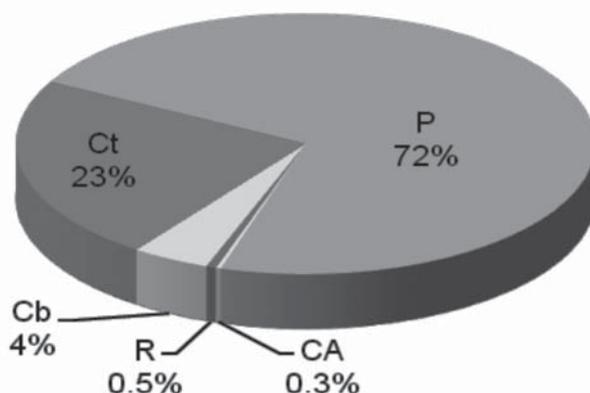
### Pasto (Región Pacífica)

En la Tabla 3 se resume el número de días por mes de predominancia de los orígenes de masas de aire en Pasto, el total de días anual de presencia de cada uno de los orígenes de masa de aire y su respectivo porcentaje. En la Figura 12 se representan dichos porcentajes para el año 2012.

**Tabla 3.** Origen de masas de aire en Pasto durante el año 2012 (número de días al mes)

| Mes          | Tipo de origen |          |           |            |            |            |
|--------------|----------------|----------|-----------|------------|------------|------------|
|              | Cb             | AE       | Ct        | P          | CA         | R          |
| Enero        | 9              | 0        | 0         | 22         | 0          | 0          |
| Febrero      | 6              | 0        | 1         | 22         | 0          | 0          |
| Marzo        | 1              | 0        | 4         | 26         | 0          | 0          |
| Abril        | 0              | 0        | 9         | 21         | 0          | 0          |
| Mayo         | 0              | 0        | 1         | 30         | 0          | 0          |
| Junio        | 0              | 0        | 8         | 22         | 0          | 0          |
| Julio        | 0              | 0        | 8         | 23         | 0          | 0          |
| Agosto       | 0              | 0        | 16        | 15         | 0          | 0          |
| Septiembre   | 0              | 0        | 10        | 20         | 0          | 0          |
| Octubre      | 0              | 0        | 12        | 16         | 1          | 2          |
| Noviembre    | 0              | 0        | 8         | 22         | 0          | 0          |
| Diciembre    | 0              | 0        | 7         | 24         | 0          | 0          |
| <b>Total</b> | <b>16</b>      | <b>0</b> | <b>84</b> | <b>263</b> | <b>1</b>   | <b>2</b>   |
| <b>%</b>     | <b>4</b>       | <b>0</b> | <b>23</b> | <b>72</b>  | <b>0.3</b> | <b>0.5</b> |

Cb: Caribe; AE: Atlántico Este; Ct: Continental; P: Pacífico; CA: Centroamérica; R: Regional



**Figura 12.** Frecuencia en porcentaje de orígenes de masas de aire en Pasto durante el año 2012

Como se puede observar, el origen de masas de aire más frecuente en Pasto fue P (72%), seguido por Ct (23%). En menor medida se encuentran los orígenes Cb (4%), R (0.5%) y CA (0.3%). Ningún día se identificó masas de aire de origen AE.

La mayor frecuencia de masas de aire de origen P (predominante en esta ciudad a 750 y 1500 m) se presentó en el mes de mayo (30 días) (Figura 13), seguido de marzo, diciembre y julio (26, 24 y 23 días respectivamente). Los días de menor predominancia de masa de aire de origen P se registraron en agosto (15 días), mes en el cual prevaleció el origen Ct. Esto significa que el origen de masas P predominó claramente durante todo el año, excepto en el mes de agosto (Figura 14).

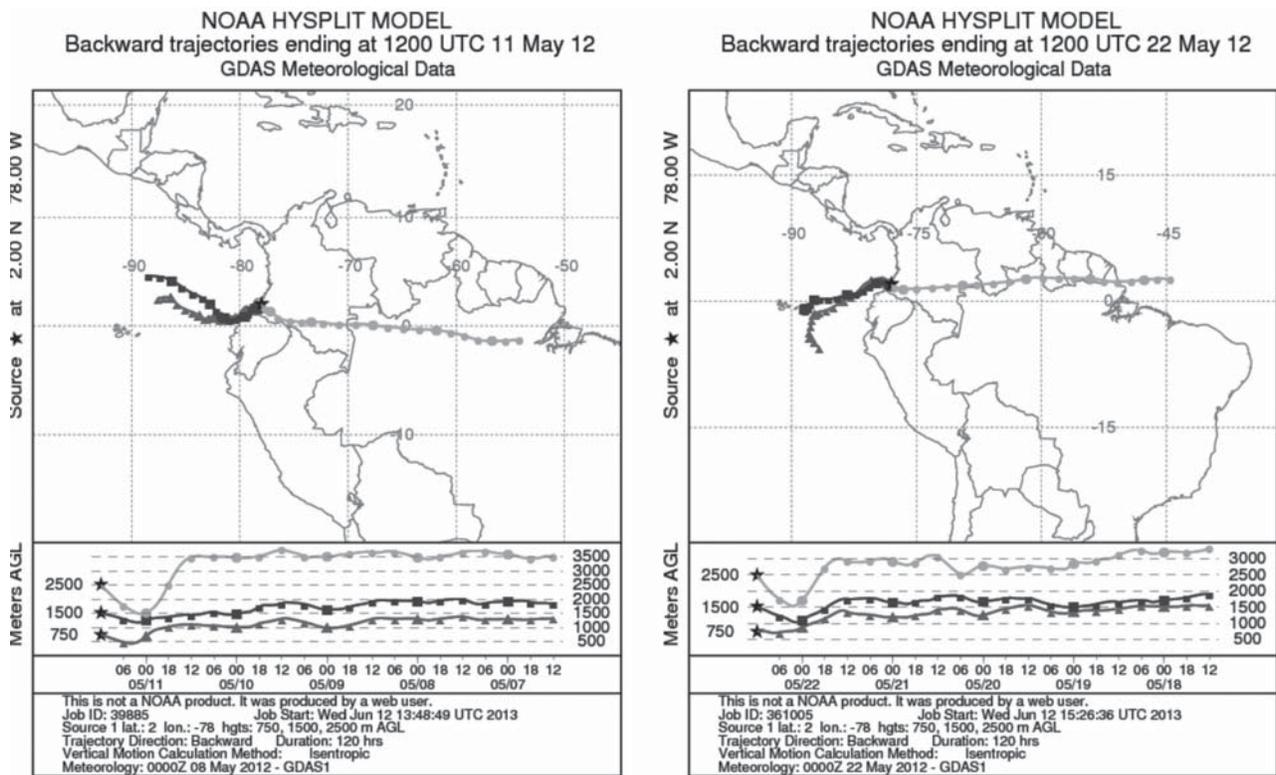


Figura 13. Comportamiento de masas de aire en Pasto, origen P

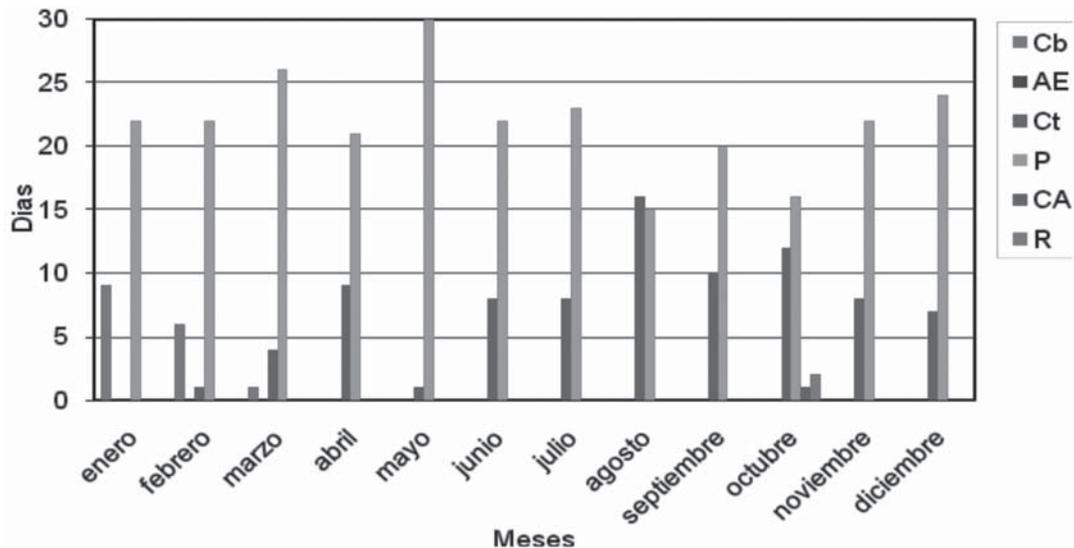


Figura 14. Distribución mensual de orígenes de masas de aire en Pasto durante el año 2012

Enero, febrero y marzo fueron los meses en los que por 16 días (durante los tres meses) se presentaron orígenes de masas Cb a 750 y 1500 m (Figura 15).

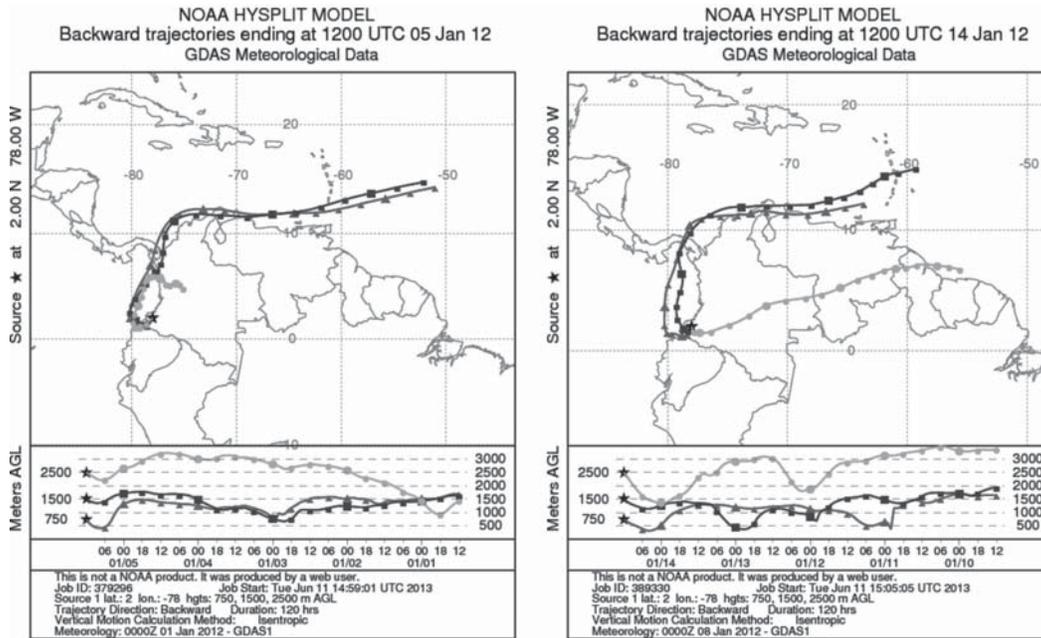


Figura 15. Comportamiento de masas de aire en Pasto, origen Cb

Agosto, octubre y septiembre (con 16, 12 y 10 días respectivamente) fueron los meses en donde se obtuvieron más días de orígenes de masas Ct. Estos últimos, sin ser predominantes, provinieron del Noroeste del Ecuador (a 750 m) y del Norte y Oeste Brasileiro (a 1500 y 2500 m) (Figura 16). Esto resulta de gran interés para el análisis de los aportes contaminantes que recibe la masa de aire, incluyendo material particulado proveniente de incendios forestales y quema de biomasa.

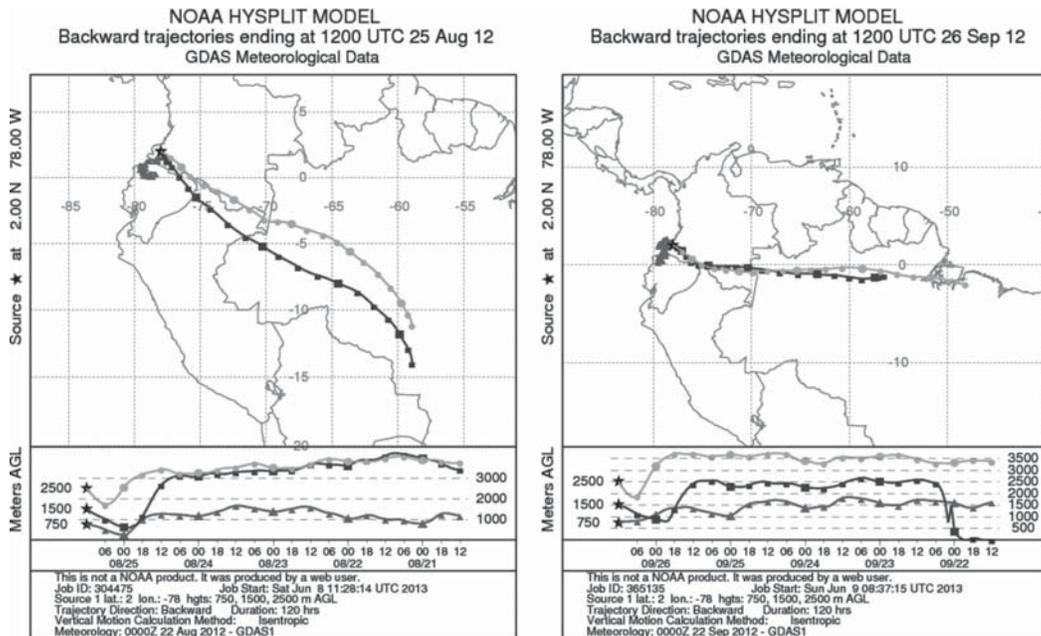


Figura 16. Comportamiento de masas de aire en Pasto, origen Ct

Tan sólo un día en el mes de octubre se identificaron masas de aire de origen CA, por lo que no resulta de interés para los efectos de este estudio.

### Leticia (Región Amazonía)

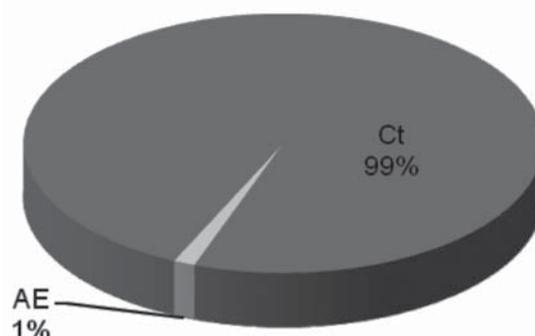
En la Tabla 4 se resume el número de días por mes de predominancia de los orígenes de masas de aire en Leticia, el total de días anual de presencia de cada uno de los orígenes de masa de aire y su respectivo porcentaje. En la Figura 17 se representan dichos porcentajes para el año 2012.

**Tabla 4.** Origen de masas de aire en Leticia durante el año 2012 (número de días al mes)

| Mes          | Tipo de origen |          |            |          |          |          |
|--------------|----------------|----------|------------|----------|----------|----------|
|              | Cb             | AE       | Ct         | P        | CA       | R        |
| Enero        | 0              | 0        | 31         | 0        | 0        | 0        |
| Febrero      | 0              | 1        | 28         | 0        | 0        | 0        |
| Marzo        | 0              | 1        | 30         | 0        | 0        | 0        |
| Abril        | 0              | 0        | 30         | 0        | 0        | 0        |
| Mayo         | 0              | 1        | 30         | 0        | 0        | 0        |
| Junio        | 0              | 0        | 30         | 0        | 0        | 0        |
| Julio        | 0              | 0        | 31         | 0        | 0        | 0        |
| Agosto       | 0              | 0        | 31         | 0        | 0        | 0        |
| Septiembre   | 0              | 0        | 30         | 0        | 0        | 0        |
| Octubre      | 0              | 0        | 31         | 0        | 0        | 0        |
| Noviembre    | 0              | 1        | 29         | 0        | 0        | 0        |
| Diciembre    | 0              | 1        | 30         | 0        | 0        | 0        |
| <b>Total</b> | <b>0</b>       | <b>5</b> | <b>361</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>0</b> |
| <b>%</b>     | <b>0</b>       | <b>1</b> | <b>99</b>  | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>0</b> |

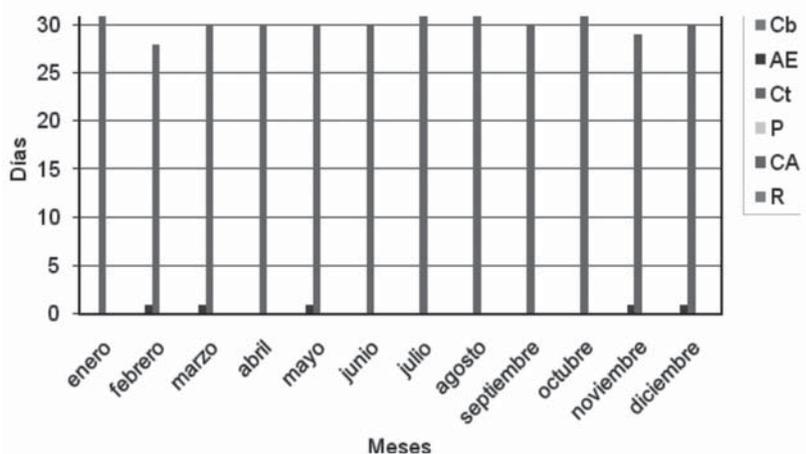
Cb: Caribe; AE: Atlántico Este; Ct: Continental; P: Pacífico; CA: Centroamérica; R: Regional

De los resultados obtenidos se observa que, de forma contundente, el origen de masas de aire más frecuente en esta ciudad fue Ct (99%) y en menor proporción el origen AE (1%). Ningún día se detectaron masas de aire de origen Cb, P, CA y R.



**Figura 17.** Frecuencia en porcentaje de orígenes de masas de aire en Leticia durante el año 2012

Todos los meses del año presentan un claro predominio de masas de aire de origen Ct. Tan sólo durante 5 días del año se identificó un origen de masas de aire diferente, correspondiente al origen AE (Figura 18).



**Figura 18.** Distribución mensual de orígenes de masas de aire en Leticia durante el año 2012

Durante los meses de enero a mayo, así como en diciembre, las masas de aire de origen Ct provienen, principalmente, del Noreste y Sur de Venezuela, del Norte de Brasil y de la región de Las Guayanas (Figura 19).

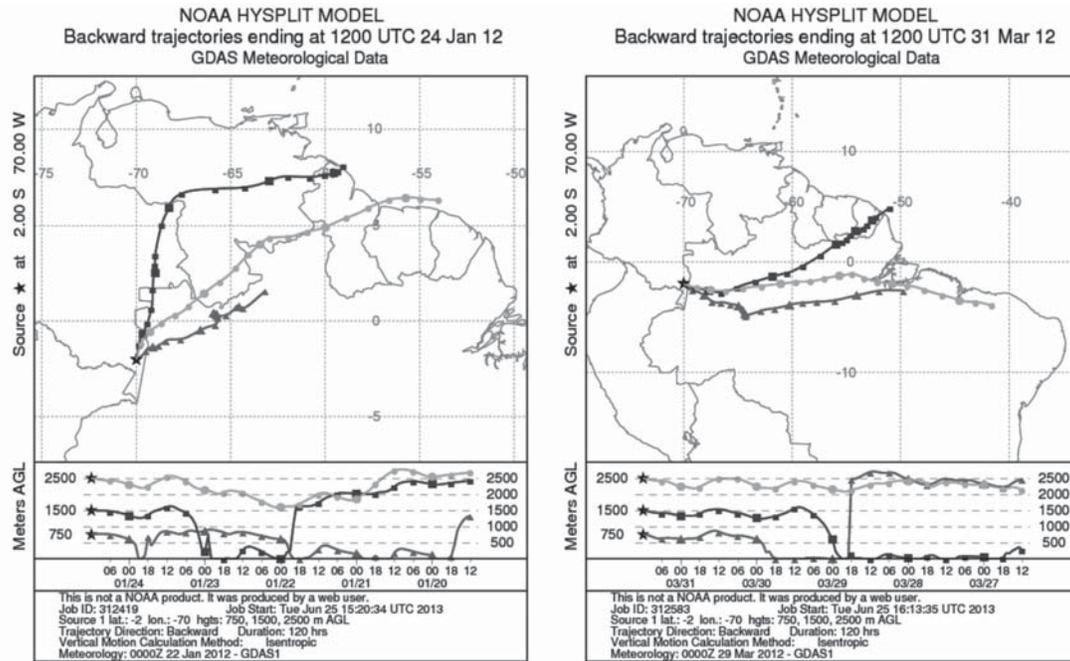


Figura 19. Comportamiento de masas de aire entre enero y mayo de 2012 (Leticia)

En contraste, entre los meses de junio y noviembre las masas de aire provienen esencialmente del Norte, Este, Oeste y región central de Brasil (Figura 20). Esto resulta de gran interés en el análisis de los aportes contaminantes que recibe la masa de aire, incluyendo material particulado (hollín) proveniente de incendios forestales y quema de biomasa en la región amazónica.

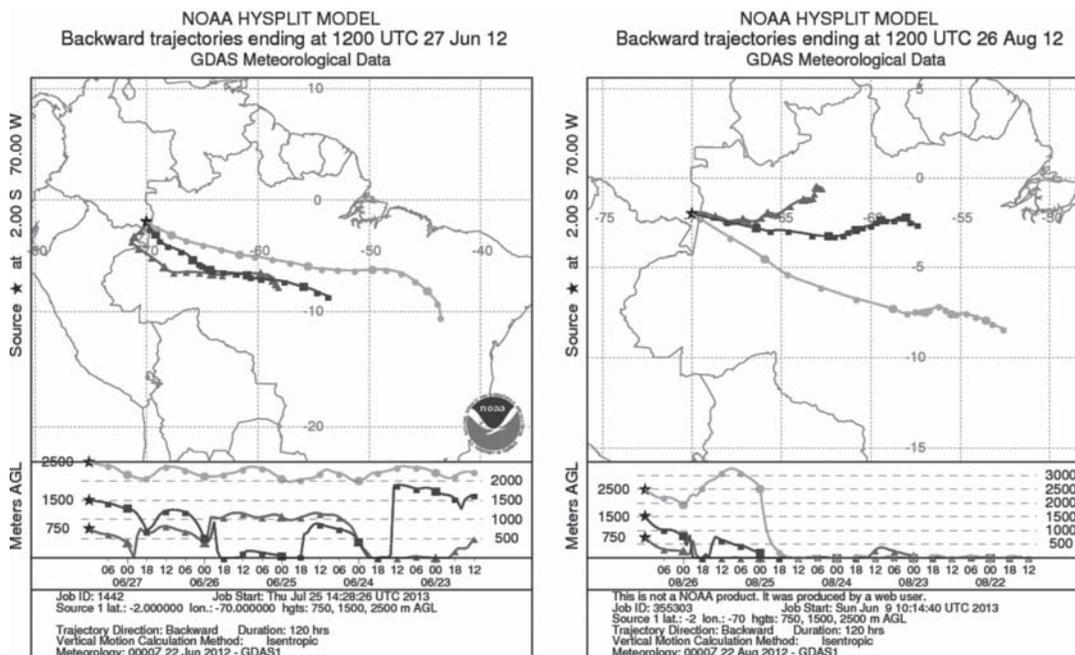


Figura 20. Comportamiento de masas de aire entre mayo y septiembre de 2012 (Leticia)

## Conclusiones

Se realizó un estudio de origen de masas de aire en cuatro ciudades colombianas localizadas en cuatro diferentes regiones naturales del país durante el año 2012. El origen de masas de aire más frecuente en Cartagena de Indias fue Caribe (45%), seguido por Continental (36%). En Bogotá fue Continental (77%), seguido por Atlántico Este (19%). En Pasto fue Pacífico (72%), seguido por Continental (23%). Y en Leticia fue Continental (99%) seguido por el origen Atlántico Este (1%).

Los resultados evidencian que el comportamiento de las masas de aire que arriban a estas urbes, y por lo tanto los fenómenos de transporte de material particulado asociados a ellas, difieren sustancialmente entre sí. Esto significa que futuros estudios que pretendan analizar el aporte de material particulado atmosférico proveniente de largas distancias en el país deberán realizarse de forma diferenciada a nivel regional.

Los análisis obtenidos en este trabajo son de importancia para futuros estudios que pretendan evaluar eventos de intrusión de material particulado atmosférico (polvo y hollín, particularmente, incluso microorganismos adheridos a éstos), en las ciudades mencionadas (o áreas próximas), provenientes de eventos (aún por explorar en el contexto colombiano) como incendios forestales, quema de biomasa y transporte a larga distancia de polvo de grandes desiertos como el Sahara.

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

## Literatura citada

1. Artinano, B., Salvador, P., Alonso, D., Querol, X. & Alastuey, A. (2003). Anthropogenic and natural influence on the PM10 and PM2.5 aerosol in Madrid (Spain). Analysis of high concentration episodes. *Environmental Pollution* 125, 453-465.
2. Boian, C. & Kirchoff, V. (2004). Measurements of CO in an aircraft experiment and their correlation with biomass burning and air mass origin in South America. *Atmospheric Environment* 38, 6337-6347.
3. Carnelley, T. & Le, X. (2001). Correlation between chemical characteristics and biological reactivity of particulate matter in ambient air. Alberta: Environmental Sciences Division.
4. Coury, C. & Dillner, A.M. (2007). Trends and sources of particulate matter in the Superstition wilderness using air trajectory and aerosol cluster analysis. *Atmospheric Environment* 41, 9309-9323.
5. Cowie, G., Lawson, W. & 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).
6. Davis, R., Normile, C., Sitka, L., Hondula, D., Knight, D., Gawtry, S. & Stenger, P. (2010). A comparison of trajectory and air mass approaches to examine ozone variability. *Atmospheric Environment* 44, 64-74.
7. Draxler, R. (1999). *HYSPLIT4 user's guide*. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-230, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
8. Draxler, R. & Hess, G. (1997). Description of the HYSPLIT\_4 modeling system. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 24 pp.
9. Draxler, R. & Hess, G. (1998). An overview of the HYSPLIT-4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. *Australian Meteorology Magazine* 47, 295-308.
10. Escudero, M., Stein, A., Draxler, R., Querol, X., Alastuey, A., Castillo, S. & Avila, A. (2011). Source apportionment for African dust outbreaks over the Western Mediterranean using the HYSPLIT model. *Atmospheric Research* 99, 518-527.
11. González, S. (2009). Paralelización de la obtención de datos de entrada del modelo de concentraciones de HYSPLIT. Serie de Notas Técnicas Digitales del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña. Nota Técnica Digital No. 2. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
12. Jorba, O., Pérez, C., Rocabados, F. & Baldasano, J. M. (2004). Cluster analysis of 4-day backward trajectories arriving in the Barcelona area Spain, from 1997 to 2002. *Journal of Applied Meteorology* 43, 887-901.
13. Kedia, S. & Ramachandran, S. (2008). Latitudinal and longitudinal variation in aerosol characteristics from Sun photometer and MODIS over the Bay of Bengal and Arabian Sea during ICARB. *Journal of Earth System Science* 117, 375-387.

14. Merbitz, H., Fritz, S. & Schneider, Ch. (2012). Mobile measurements and regression modeling of the spatial particulate matter variability in an urban area. *Science of the Total Environment* 438, 389–403.
15. Middleton, N., Yiallouros, P., Kleanthous, S., Kolokotroni, O., Schwartz, J., Dockery, D., Demokritou, P. & Koutrakis, P. (2008). A 10-year time-series analysis of respiratory and cardiovascular morbidity in Nicosia, Cyprus: The effect of shortterm changes in air pollution and dust storms. *Environmental Health* 7 (39), 1-16.
16. Pongkiatkul, P. & Kim, N. (2007). Assessment of potential long-range transport of particulate air pollution using trajectory modeling and monitoring data. *Atmospheric Research* 85, 3-17.
17. Salvador, P., Artinano, B., Querol, X. & Alastuey, A. (2008). A combined analysis of backward trajectories and aerosol chemistry to characterise long-range transport episodes of particulate matter: the Madrid air basin, a case study. *Science of the Total Environment* 390, 495-506.
18. Stefan, S., Necula, C. & Georgescu, F. (2010). Analysis of long-range transport of particulate matters in connection with air circulation over Central and Eastern part of Europe. *Physics and Chemistry of the Earth* 35, 523–529.
19. Tang, L., Haeger-Eugensson, M., Sjöberg, K., Wichmann, J., Molnár, P. & Sallsten, G. (2014). Estimation of the long-range transport contribution from secondary inorganic components to urban background PM10 concentrations in south-western Sweden during 1986–2010. *Atmospheric Environment* 89, 93-101.
20. Uno, I., Eguchi, K., Yumimoto, K., Takemura, T., Uematsu, M., Liu, Z., Wang, Z., Hara, Y. & Sugimoto, N. (2009). Asian dust transported one full circuit around the globe. *Nature Geoscience* 2, 557-560.
21. Vardoulakis, S. & Kassomenos, P. (2008). Sources and factors affecting PM10 levels in two European cities: implications for local air quality management. *Atmospheric Environment* 42, 3949-3963.
22. Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Cuevas, E. & 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.
23. Wagstrom, K. & Pandis, S. (2011). Contribution of long range transport to local fine particulate matter concerns. *Atmospheric Environment* 45, 2730-2735.
24. Weber, S. (2009). Spatio-temporal covariation of urban particle number concentration and ambient noise. *Atmospheric Environment* 43, 5518-5525.
25. WHO - World Health Organization (1999). Air Quality Guidelines. Geneva: World Health Organization.
26. WHO - World Health Organization (2006). WHO Air Quality Guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005. Geneva: World Health Organization.
27. WHO - World Health Organization (2011). Health in the green economy: health co-benefits of climate change mitigation – housing sector. Geneva: World Health Organization.