



Caracterización del fenómeno de inversión térmica en el Valle de Aburrá

Dina Vanessa Gómez Rave

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Directores

Ángela María Rendón Pérez, Doctor (PhD) en Ingeniería Ambiental

Juan Fernando Salazar, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia

2018

Cita	(Gomez D.V, 2018)
Referencia	Gomez Rave, D. V. (2018). <i>Caracterización del fenómeno de inversión térmica en el Valle de Aburrá</i> . [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Ingeniería Ambiental, Cohorte XXV.

Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Julio Cesar Saldarriaga Molina

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Caracterización del fenómeno de inversión térmica en el Valle de Aburrá

Dina V. Gómez¹, Ángela M. Rendón¹, Juan F. Salazar¹

¹Grupo GIGA,
Universidad de Antioquia.

Resumen

Los valles urbanizados pueden experimentar serios problemas de contaminación atmosférica, como resultado del efecto combinado de su limitada ventilación y de la alta emisión de contaminantes desde las áreas urbanas. La ventilación puede ser limitada no solo por las barreras orográficas, sino también por el efecto de estancamiento asociado con la ocurrencia de capas estables o de inversión térmica cerca de la superficie. La ocurrencia de estas capas de inversión térmica puede afectar fuertemente la calidad del aire de un valle urbano debido a su influencia en el intercambio de aire entre las capas más superficiales y la atmósfera superior. Una mejor comprensión de las características de las inversiones térmicas y su relación con la calidad del aire es de particular importancia para los procesos de toma de decisiones, en particular aquellos relacionados con la planeación urbana en ciudades en desarrollo, ubicadas en terrenos de montaña. De manera particular, el Valle de Aburrá (Colombia) es un valle de topografía compleja y altamente urbanizado, en donde se ha reportado la ocurrencia de inversiones térmicas con regularidad. A través de un análisis de información observada de la temperatura real de la atmósfera local durante los años 2015 y 2016, se caracteriza el proceso de formación y de rompimiento de las capas de alta estabilidad atmosférica, así como su variabilidad estacional. Finalmente, se discuten las implicaciones de estos eventos en la calidad del aire del valle.

Palabras claves: Inversión térmica, Estabilidad, Valles urbanos, Contaminación atmosférica, Calidad del aire, Valle de Aburrá.

1. Introducción

El crecimiento de las ciudades está ligado a las actividades antrópicas que allí se desarrollan, tales como el transporte, la producción económica y la urbanización. Estas actividades suponen procesos sobre la superficie terrestre, que hacen que ésta no sólo cambie en la forma y en los componentes que la estructuran, sino que alteran algunos de los procesos naturales en los que la superficie desempeña un papel fundamental (Carvajal y Pabón, 2016). Entre los principales procesos que se ven afectados por los cambios en la superficie de las ciudades, están los que ocurren en la baja atmósfera, esencialmente en lo relacionado con los balances de masa y energía, los flujos de calor y el transporte de contaminantes y de material particulado (Liang y Keener, 2015). Estos dos aspectos han sido ampliamente estudiados, por su relación directa con la calidad del aire de las ciudades (Holmes *et al.*, 2015; Sarrat *et al.*, 2006; Bach, 1970).

Es así como se establece una estrecha y compleja relación entre la topografía, las características de la superficie y el clima, con implicaciones en los balances de energía, en los campos de circulación y precipitación, y en el transporte de especies químicas y contaminantes (Jiménez, 2016). La topografía juega entonces un papel crucial en la producción de gradientes de temperatura, siendo diferente si se trata de un valle o una zona plana (e.g. debido al Factor

de Amplificación Topográfico - FAT). Un valle encierra menos volumen atmosférico que una llanura, por lo que la misma energía en ambas superficies puede resultar en un mayor cambio de temperatura en la atmósfera del primero (Mejía y Jiménez, 2002). Es por esto que, en la baja atmósfera de valles, es común que se presente el fenómeno de inversión térmica (Savov *et al.*, 2002; Whiteman, 2000; Oke, 1995), relacionado con los procesos que tienen lugar en la superficie, y que, a su vez, condiciona los procesos de circulación y de transporte atmosféricos.

Una de las principales características del fenómeno de inversión térmica es la estabilidad estática que restringe el intercambio turbulento y el arrastre entre la baja atmósfera y la atmósfera libre (Bourne, 2008), limitando el transporte de contaminantes emitidos desde la superficie (limita la ventilación), con implicaciones en las condiciones de la calidad del aire (Rendón *et al.*, 2015, 2014; Wallace *et al.*, 2010; Yao y Zhong, 2009; Janhäll *et al.*, 2006; Anquetin *et al.*, 1998). Además, en valles urbanizados, las tasas de emisión suelen ser altas, debido al desarrollo de múltiples actividades industriales y de transporte (Wallace *et al.*, 2010), lo que causa que el efecto combinado de las altas tasas de emisión y de la limitada ventilación, pueda dar lugar a serios problemas de contaminación del aire, y con esto, ocasionar problemas de salud pública (Sabzevari *et al.*, 2014; Bourne, 2008).

Diferentes estudios confirman la relación entre la ocurrencia y persistencia de inversiones térmicas y la presencia de altas concentraciones de contaminantes sobre áreas urbanas. Por ejemplo, eventos severos de contaminación del aire ocurridos en la ciudad de Logan, Estados Unidos (Malek *et al.*, 2006), en la ciudad de Santiago, Chile (Rutllant y Garreaud, 1995), en el valle Lanzhou, China (Chu *et al.*, 2008) y en Londres, Inglaterra (Ross *et al.*, 1995), se han asociado con una fuerte influencia de la dinámica de la inversión térmica en esas regiones. En la ciudad de Hamilton (Canadá), se observa como los impactos en la calidad del aire de las emisiones de la industria y el transporte son agravados por las inversiones térmicas, y fuertemente controlados por la complejidad de la topografía del terreno (Wallace *et al.*, 2010). De manera más reciente, Rendón *et al.* (2015), exponen la influencia de la orientación de un valle urbanizado sujeto a una fuerte inversión térmica, en la dinámica atmosférica local y en la polución, y concluyen que las áreas pobladas localizadas cerca a la base de las laderas del valle, pueden experimentar altas concentraciones en ciertas horas del día, debido a que los contaminantes pueden quedar atrapados por debajo de la capa de inversión, dando lugar a trampas de contaminantes (smog traps).

Vale la pena mencionar que la mayoría de los estudios citados consideran los eventos de inversión térmica en términos de los gradientes positivos de la temperatura potencial (θ) en la vertical (Z), asociados con estabilidad atmosférica. No obstante, esta investigación se concentra en el estudio de eventos de alta estabilidad y sus implicaciones en la circulación en la baja atmósfera; por lo tanto, los análisis se enfocan en las capas con un gradiente positivo de la temperatura real con la altura (T), de acuerdo con lo mostrado en la Figura 1.

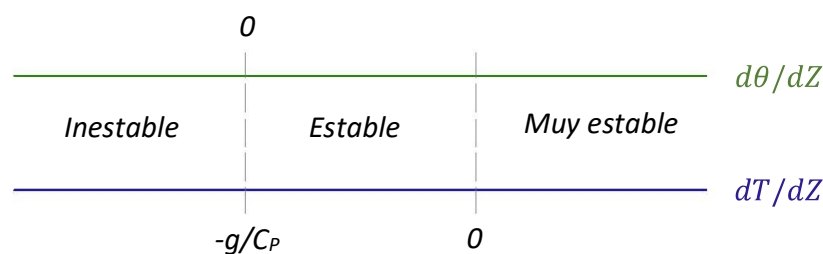


Figura 1: Criterios de estabilidad atmosférica en términos del gradiente de temperatura vertical dT/dZ y del gradiente de temperatura potencial vertical $d\theta/dZ$. Adaptado de Cushman-Roisin (2014).

De ese modo, la inversión térmica se caracteriza por la ocurrencia de una capa atmosférica en donde la temperatura aumenta con la altura, es decir, en la que el gradiente de temperatura es

positivo (Rendón *et al.*, 2015, 2014; Whiteman y McKee, 1980). Una descripción más precisa, la presenta Rendón *et al.* (2007): “En condiciones típicas y de cielo despejado, la temperatura troposférica disminuye con la altura, favoreciendo el transporte vertical de humedad (muy relevante en los trópicos) y de contaminantes desde la superficie hasta la atmósfera; esto sucede por el calentamiento de la superficie por efecto de la radiación solar y el transporte de energía por vientos advectivos. Sin embargo, bajo ciertas condiciones atmosféricas que tienen lugar con mayor frecuencia en las horas de la noche, existen capas en las que la temperatura aumenta con la altura, es decir, el gradiente de temperatura aumenta, dando lugar a una inversión térmica”. Al respecto, Garratt (1993) hace referencia al desarrollo y evolución de esas capas a lo largo del día, así: (1) En la mañana, se da el rompimiento de la capa de inversión térmica nocturna debido al calentamiento y a la formación de una capa superficial de mezclado; (2) luego se desarrolla una capa límite de mezclado, con presencia e intensificación de vientos al medio día; (3) en horas de la tarde, se da una estratificación en las regiones superiores de la capa límite convectiva; y (4) se da la aparición de una capa de inversión térmica nocturna, asociada al enfriamiento de la superficie por ausencia de la radiación solar.

Se llama entonces formación al proceso que da lugar a la aparición de una capa de inversión. En un valle urbanizado, generalmente este proceso tiene lugar durante las horas de la noche o primeras horas de la madrugada, de manera que alrededor del amanecer se puede tener una capa de inversión bien desarrollada. Este proceso está controlado principalmente por el balance de energía superficial. Durante la formación, las condiciones de la superficie y la baja atmósfera son tales que la primera se enfría más rápidamente que la segunda, dando entonces lugar al gradiente de temperatura positivo que caracteriza la inversión. Algunos factores que influyen sobre el proceso de formación incluyen: (i) irradiación: la tierra irradia el calor, en las noches frías, con más rapidez que el aire, (ii) la topografía: el aire enfriado en las capas bajas de la tropósfera se desliza por las laderas y se puede estancar en los valles, (iii) advección: transporte horizontal de aire frío por debajo o de aire cálido por encima, dando lugar a capas estratificadas, (iv) subsidencia de aire frío sobre capas de aire más caliente, (v) presencia de frentes o inversión frontal (Bello, 2008). Típicamente, el proceso de formación de la inversión térmica dura algunas horas (es observable dentro del ciclo diurno), aunque no necesariamente todas las noches se forma una capa de inversión, debido a la dependencia que tiene el proceso de los múltiples factores que pueden afectar el balance de energía superficial local (Rendón *et al.*, 2015, 2014; McNider y Pielke, 1981; Whiteman y McKee, 1980; André *et al.*, 1978).

Por otro lado, el rompimiento de la inversión térmica es el proceso que conduce a su desaparición; la energía que lo activa es la radiación incidente, que se transforma en calor sensible (Whiteman y McKee, 1980). Esta energía se distribuye en dos procesos, que son los encargados del rompimiento: (i) el ascenso de la base de la inversión, por la formación de una capa límite convectiva, CBL, y (ii) el descenso del tope de la inversión, por la remoción de aire por vientos de ladera (Zoumakis y Efstathiou, 2006; Whiteman y McKee, 1982, 1980). En valles no urbanizados, en altas latitudes y bajo condiciones de escasa humedad (atmósfera seca), se han idealizado tres posibles patrones para el rompimiento de la inversión por acción de la radiación, los cuales se esquematizan en la Figura 2, y se describen a continuación: (i) la radiación solar ocasiona la formación de una capa límite convectiva (CBL) como respuesta al calentamiento de la superficie, la cual crece con el tiempo e introduce turbulencia en la capa de inversión hasta alcanzar la altura del tope (momento en el que se da el rompimiento); (ii) la energía que entra al sistema ocasiona transporte de masa por los vientos ascendentes de ladera hacia el exterior del valle, y por tanto, descenso del tope de inversión, el cual continúa hasta que se da el rompimiento; (iii) el proceso que ocasiona el rompimiento es un efecto combinado de los dos patrones anteriores (Rendón, 2007; Whiteman, 1982; Whiteman y McKee, 1982).

Al igual que en el proceso de formación, típicamente el proceso de rompimiento dura algunas horas, es decir, es observable durante el ciclo diurno (Rendón, 2007; André *et al.*, 1978). No obstante, el rompimiento no siempre se completa durante un mismo día. Se han identificado

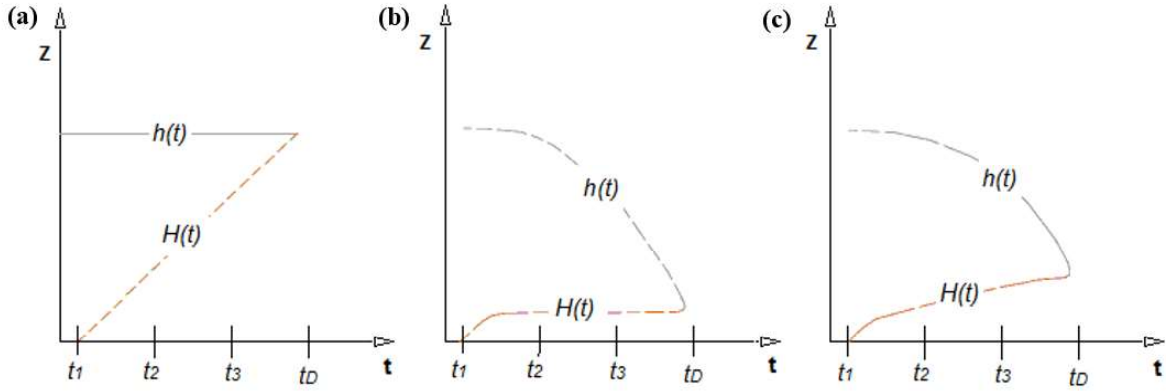


Figura 2: Patrones de rompimiento idealizados por Whiteman, donde $H(t)$ es la altura de la CBL y $h(t)$ la altura del tope de la inversión, Z la altura y t el tiempo. (a) Crecimiento de la CBL. (b) Descenso del tope. (c) Combinación de (a) y (b). Adaptado de (Whiteman y McKee, 1982).

casos en los que una capa de inversión persiste durante varios días, lo cual puede tener serias implicaciones sobre la calidad del aire. Un caso puntual ocurrió en la ciudad de Londres (Inglaterra) en diciembre de 1991, en donde se experimentó un episodio único de contaminación atmosférica, durante el cual las concentraciones de dióxido de nitrógeno llegaron a niveles pico, como resultado de que las emisiones de contaminantes se quedaran atrapadas bajo la influencia de una capa de inversión, que permaneció durante casi una semana. Este episodio se relacionó con un incremento en la mortalidad y en la morbilidad de la ciudad (Ross *et al.*, 1995).

De hecho, la inversión térmica no siempre se da de la misma manera. Puede haber diferencias en las características de las capas de inversión (e.g. espesor, gradiente de temperatura) y/o en sus dinámicas, es decir, en los procesos de formación y/o rompimiento (Zoumakis y Efstathiou, 2006; Colette *et al.*, 2003; Anquetin *et al.*, 1998; Whiteman y McKee, 1980; Brost y Wyngaard, 1978). A su vez, esas diferencias pueden dar lugar a distintos efectos sobre la calidad del aire (Rendón *et al.*, 2015, 2014). Por ejemplo, para diferentes condiciones, se han encontrado diferentes patrones de rompimiento. Las simulaciones de Colette *et al.* (2003) concluyen que la duración de la inversión varía con el ancho y la profundidad del valle; las de Anquetin *et al.* (1998) muestran que el rompimiento también varía con las estaciones (por las condiciones de la radiación, relacionadas con el calentamiento de la superficie); Bader and McKee (1985) proponen que el decrecimiento en la tasa de calentamiento de la superficie del valle, también puede retrasar el rompimiento de la capa de inversión. Rendón *et al.* (2015; 2014) plantean que la variación estacional del rompimiento podría ser interpretada, de manera general, como una consecuencia del incremento del calentamiento de la superficie, el cual también podría ser un resultado de cambios en el uso y en la cobertura del suelo (como los causados por la urbanización).

En Colombia son muy representativos, aunque pocos, los estudios de este fenómeno para el caso particular del Valle de Aburrá, específicamente para la ciudad de Medellín, una de las ciudades de montaña más pobladas e industrializadas del país (Uribe, 2004). El Valle exhibe peculiaridades complejas, como el hecho de estar altamente urbanizado, ubicarse en una región tropical, exhibir una alta humedad atmosférica y tener una topografía de valle estrecho. Ríos (2001) presenta una primera aproximación al entendimiento del fenómeno en el valle, a través de un modelo puntual, basado en los mismos planteamientos y variables del modelo de Whiteman; Rendón *et al.* (2007) implementan un modelo para el rompimiento de la inversión térmica, sugiriendo, entre otras cosas, que el proceso más importante que lo afecta es el descenso del tope de la inversión, como resultado de la remoción de masa por los vientos ascendentes de ladera. Henao *et al.* (2012) estudian el proceso de estabilidad atmosférica en relación con la inversión térmica en el Valle de Aburrá por medio del sistema de monitoreo ambiental basado

en cámaras de video, encontrando que en horas de la mañana (entre 06:00 y 09:30 UTC-5) hay una transición en la estabilidad atmosférica, fenómeno visible en las imágenes capturadas. Posteriormente, Rendón *et al.* (2015, 2014) amplían los alcances de este estudio mediante nuevos modelos que involucran la variabilidad topográfica, los albedos reales de la superficie, la variación temporal y espacial de la radiación solar y la influencia de los procesos atmosféricos que tienen lugar en el valle.

Entre otros estudios relacionados con el fenómeno en el Valle de Aburrá, se destacan los de Adarve y Molina (1984), quienes realizan una aproximación al estudio de la circulación de vientos en el valle, a partir de datos tomados en superficie; Mejía y Jiménez (2002) plantean un modelo conceptual de las características de la zona y de los campos de vientos asociados a gradientes térmicos; Correa *et al.* (2009) utilizan información de campo para analizar la interacción y el acoplamiento de los vientos en la atmósfera libre con patrones de circulación al interior del valle; y Pérez *et al.* (2011) presentan algunos aspectos descriptivos de la circulación en vientos a escala local en los primeros 1000 metros de la capa límite atmosférica del valle. Así mismo y de manera más reciente, otros estudios que se enfocan en el entendimiento físico de los procesos que afectan la estructura térmica del valle y de las posibles relaciones de ésta con el transporte de materiales en la atmósfera, son: Herrera (2015), que reconoce a la altura de la capa límite atmosférica (CLA) como uno de los factores meteorológicos fundamentales que modulan la calidad del aire en superficie, incidiendo en los procesos de dispersión y convección, relacionados con el grado de estabilidad o inestabilidad atmosférica. En ese sentido, comprueba además que los gradientes de temperatura entre la superficie y la atmósfera son los que provocan los cambios en la estructura de la capa límite, siendo éstos los generadores de los procesos de mezclado y turbulencia en la atmósfera baja, y encontrándose que para el caso del Valle de Aburrá, la menor altura de esta capa se presenta en el mes de marzo, y la mayor, en junio. Jiménez (2016) estudia el papel de la altura de la capa de mezcla en la dispersión de contaminantes en la capa límite atmosférica de un ambiente urbano, específicamente para el Valle de Aburrá, en donde en buena medida los factores topográficos que lo condicionan generan una débil circulación de contaminantes, y de manera consecuente, una calidad del aire deficiente. Se confirma que los efectos urbanos alteran significativamente las condiciones atmosféricas superficiales, así como la considerable variabilidad de la altura de la capa de mezcla, que no sólo se relaciona con la radiación solar incidente, sino posiblemente con variables como la lluvia, la nubosidad y la topografía, las cuales pueden afectarla de un modo más directo. Cuervo (2017), que evalúa la variabilidad del vapor de agua sobre el Valle de Aburrá, así como su rol en los diferentes procesos termodinámicos de la tropósfera, que no sólo se limita a la formación de los eventos de precipitación, sino también al desarrollo y extensión de la capa límite atmosférica y sus efectos en la calidad del aire, encontrando que la altura de la capa límite es menor en los meses de transición entre las temporadas húmedas y secas. En cuanto a la estabilidad atmosférica del valle, se propone que, debido a su configuración topográfica, se experimentan condiciones permanentes de estabilidad atmosférica, las cuales generan una condición crítica del estado de la calidad del aire.

La frecuencia con la que la inversión térmica ocurre en el Valle de Aburrá aún no tiene una respuesta clara dentro de los estudios referenciados; no obstante, en este tipo de valles montañosos es muy común su ocurrencia (Allen, 2015; Rendón *et al.*, 2015, 2014; Malek *et al.*, 2006; Bader y McKee, 1985; Whiteman y Müller, 1988). Esta es una pregunta clave, que en la presente investigación constituye uno de sus objetivos: las inversiones térmicas en el trópico han sido menos estudiadas, y las particularidades del Valle de Aburrá, un valle montañoso tropical (lo que implica alta disponibilidad de radiación solar durante todo el año, en comparación con otras latitudes), relativamente húmedo (de manera consistente con la ubicación tropical del valle), y bastante estrecho, con presencia de un denso asentamiento urbano en el fondo e incluso en sus laderas (por lo que se afecta significativamente el balance de energía superficial), hacen que sea estratégico extender el conocimiento y la información existente para la caracterización

y el estudio de los procesos de formación y de rompimiento de la inversión térmica, en la escala del ciclo diurno y en su variabilidad estacional a lo largo del año.

Entender y caracterizar el comportamiento de los procesos de circulación y transporte de los contaminantes en el interior del valle, que inciden directamente en la calidad del aire de la región, tiene un especial protagonismo para la gestión ambiental local (Herrera, 2015; Rendón *et al.*, 2015, 2014; Correa *et al.*, 2009; Rendón *et al.*, 2007). En el caso del Valle de Aburrá, ha sido de gran importancia el estudio de la contaminación atmosférica por la presencia de material particulado de fracción respirable (Becerra *et al.*, 2016; Gómez *et al.*, 2017; Zapata *et al.*, 2016; Toro y Quiceno, 2015); de manera específica, el material particulado conocido como PM_{2.5} (con un diámetro aerodinámico inferior a 2,5 micras) ha sido de gran interés, por sus efectos en la salud humana y por su relación con las actividades industriales y de transporte, ya que, debido a su tamaño, al ingresar al tracto respiratorio se pueden alojar en los sacos alveolares e ir al torrente sanguíneo, causando diversas afectaciones cardiopulmonares (Lin *et al.*, 2017; Arango *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2016; Feng *et al.*, 2016). En ese sentido, es claro que en el Valle de Aburrá se ha incrementado el número de automóviles y motocicletas, en cerca de un 12 % anual en la última década, producto de las facilidades para adquirir vehículos, la subvalorización de los vehículos no motorizados y las fallas en los transportes públicos, teniéndose entonces problemas de congestión, consumo de energía y contaminación atmosférica (AMVA-UPB, 2017). Bajo ese panorama se vuelve importante entonces estudiar la relación entre las capas de alta estabilidad atmosférica e inversión térmica, y sus implicaciones en la calidad del aire del Valle de Aburrá.

2. Métodos y datos

2.1. Zona de estudio

En la Figura 3 se presenta la configuración topográfica del Valle de Aburrá, que corresponde a la cuenca natural del río Medellín, siendo una subregión del departamento de Antioquia, Colombia, que se emplaza en medio de la Cordillera Central de los Andes. Es un valle estrecho, cuya extensión es de 1.152 km^2 , con un ancho máximo aproximado de 7 km y una longitud aproximada de 60 km , enmarcado por una topografía irregular y pendiente, en donde se tienen alturas que varían entre los 1.300 y los 2.800 metros sobre el nivel del mar. Su clima está controlado esencialmente por el viaje de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y por los vientos alisios. El valle exhibe dos estaciones más húmedas y lluviosas centradas alrededor de los meses de abril y octubre, sin presentar grandes variaciones térmicas estacionales, por su localización en el trópico (Hermelin, 2007; Mesa *et al.*, 1997).

Esta subregión, catalogada como la de más progreso económico y social del departamento, ha tenido un rápido crecimiento urbanístico, debido a que concentra el mayor nivel industrial, centros de educación superior y amplias coberturas en servicios públicos, albergando a más de 3 millones de habitantes (Gobernación de Antioquia, 2017). Estas particularidades del valle lo configuran como un terreno, que además de ser de topografía compleja (un valle montañoso y estrecho) y relativamente húmedo, es altamente urbanizado, por lo que la ocurrencia de inversiones térmicas, que en estudios previos se reporta como entre el 25 y 35 % de los días del año (Uribe, 2004), y su relación con la ventilación limitada y la concentración de contaminantes atmosféricos, es un aspecto fundamental en la gestión de la calidad del aire de la región. La Figura 4 que corresponde a una fotografía de Medellín tomada en las primeras horas de la mañana del jueves 3 de diciembre de 2015, muestra la presencia de una capa con condiciones de poco mezclado, y muy probablemente con presencia de contaminantes atrapados, en los niveles atmosféricos más superficiales, por debajo del tope de la topografía del valle. Este registro es importante porque, como se menciona más adelante, mediante el análisis de los datos disponibles para la caracterización del fenómeno, se encontraron dos eventos de alta estabilidad atmosférica ese día, uno en la mañana y otro en la noche.

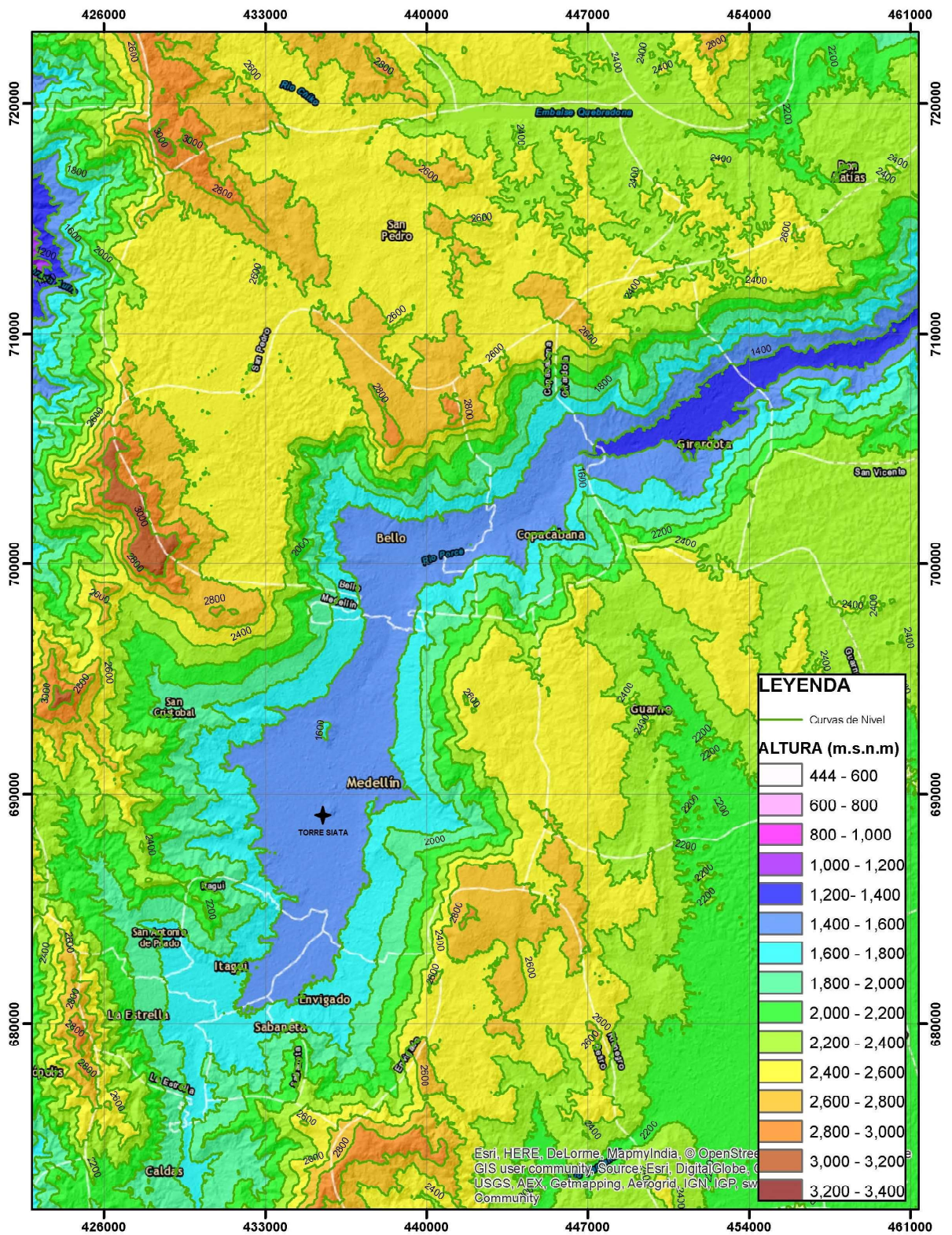


Figura 3: Topografía y altimetría del Valle de Aburrá. Sistema de coordenadas WGS84 -18N. La estrella negra corresponde a la localización de la torre SIATA.



Figura 4: Fotografía del Valle de Aburrá en condiciones de estabilidad atmosférica. Tomada por Juan Pablo Becerra Gómez. Fecha de captura: 03/12/2015.

2.2. Estructura de la base de datos

Para el estudio de las dinámicas de las capas de alta estabilidad en el Valle de Aburrá, se utilizaron datos observacionales de la atmósfera local, tomados durante un periodo comprendido entre Enero de 2015 y Septiembre de 2016, como se presenta en la tabla 1. Estos datos fueron registrados por el radiómetro microondas (MWR) del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), instalado a aproximadamente 60 m de la superficie sobre la torre SIATA (Ver Figura 3), en la ciudad de Medellín [Herrera, 2015]. Este equipo, que corresponde al modelo MP-3000A, es un sensor remoto de tecnología pasiva que produce perfiles verticales continuos en el tiempo, desde la superficie y hasta 10 km , con una alta resolución espacial y temporal para la temperatura (K), la humedad relativa (%) y el vapor de agua (g/m^3), y de baja resolución para el agua líquida (g/m^3) (Radiometrics Corporation, 2013).

Este radiómetro produce los perfiles a través de la implementación de algoritmos basados en redes neuronales artificiales, partiendo de las señales de la temperatura de brillo del cielo, que se obtienen a través de la incorporación de dos radiofrecuencias: para la información de la temperatura, las frecuencias están en una banda entre 51 y 59 GHz , mientras que para la del vapor de agua, estas frecuencias están entre 22 y 30 GHz . De este modo, la resolución vertical resultante para cada perfil es de 58 niveles en la altura, comenzando con un espaciamiento de 50 m desde la superficie hasta los 500 m , seguido por un espaciamiento de 100 m , hasta que se alcanzan los 2 km , y finalmente, un espaciamiento de 250 m , hasta que se alcanzan 10 km . En cuanto a la resolución temporal, se tienen registros de los perfiles cada 2 minutos, aproximadamente. Este equipo también cuenta con sensores meteorológicos de superficie para medir la temperatura del aire, la humedad relativa y la presión barométrica; así como con un sensor “flag” de lluvia, que indica si los datos están potencialmente contaminados por agua líquida, situación que hay que tener en cuenta en los análisis. Esto último es relevante porque dentro de las fuentes de error que se consideran para el equipo, el efecto del agua líquida en el radiómetro puede resultar en mediciones muy altas de la temperatura de brillo, durante los eventos de precipitación. En la Tabla 1 se resumen estas características de los datos utilizados.

Respecto a su operación, el equipo está configurado para registrar datos todos los días desde las 00:00 UTC hasta las 23:59 UTC. Los datos obtenidos se almacenan sistemáticamente en

Tabla 1: Características generales de los datos utilizados

Equipo de medición	Radiómetro MP-3000A (Radiometrics Corporation). Instalado a 60 m de la superficie, en la torre SIATA.
Período de tiempo analizado	623 días. Desde el 01/01/2015 y hasta el 14/09/2016.
Resolución Vertical	58 niveles, desde la superficie hasta 10 km: De 0 a 500 m: cada 50 m De 500 m a 2 km: cada 100 m De 2 km a 10 km: cada 250 m
VARIABLES REGISTRADAS en el perfil vertical	Temperatura (K), Humedad relativa (%), Vapor de agua (g/m ³), Agua líquida (%)
VARIABLES REGISTRADAS en superficie	Temperatura (K), Humedad relativa (%), Presión (mb), IRT ($\Delta T = T_{ambient} - T_{cloud}$)
Resolución temporal	2 minutos aprox.

archivos tipo CSV nombrados también de manera automática con la siguiente estructura:

yyyy - mm - dd - hh - mm - ss - xxx.csv

donde, en su orden, *yyyy* es el año, *mm* el mes, *dd* el día, *hh* la hora, *mm* el minuto y *ss* el segundo en que comenzó el registro; *xxx*, define el tipo de archivo de salida, siendo de interés, en este caso, los denominados como *Level2*, que corresponden a los registros en tiempo real de las cuatro variables atmosféricas de interés.

Hay que mencionar que los registros para algunos días no estaban, estaban incompletos o tenían un formato diferente, por lo que se omitieron para el análisis, por no considerarse confiables o representativos. Este grupo de datos corresponde al 4.5% de los 623 días considerados. Una vez hecha esta depuración preliminar, se realizó el procesamiento de los datos en el lenguaje de programación R, el cual está bajo licencia GNU y es de distribución libre. De ese modo, con la información almacenada en los archivos tipo CSV, se implementó un algoritmo para la lectura eficiente de los datos (teniendo en cuenta su densidad) y para la selección de la información de las variables de interés, que, para los propósitos de la presente investigación, corresponden a los perfiles atmosféricos de temperatura y humedad relativa, y a las mediciones en superficie de la temperatura del aire, la humedad relativa, la presión barométrica y el indicador de lluvia. Esta información se recolectó para cada uno de los días y fue el insumo base para la producción de los perfiles y contornos de temperatura. Cabe resaltar que el radiómetro del SIATA recibió oportunamente los procesos de mantenimiento y calibración de rutina, para asegurar la correcta toma de datos, y que los algoritmos implementados para la lectura y procesamiento de los datos, no se limitaron a verificaciones de problemas de formato, valores atípicos e incoherencias espaciales y temporales en los registros de las variables.

Teniendo en cuenta la configuración topográfica del valle, y que en la capa adyacente a la superficie (o Capa Límite Atmosférica, CLA) es en donde se presentan los procesos que dominan el transporte de humedad, temperatura, momentum y contaminantes (Herrera, 2015), se generaron gráficas de contorno de las temperaturas hasta una altura máxima de 1.5 km. Esas gráficas iniciales permitieron refinar la búsqueda de inversiones en superficie, encontrándose que éstas ocurrían de manera general, hasta una altura máxima de 600 m, como se presentará más adelante.

2.3. Análisis preliminar de eventos de inversión térmica en superficie

Como ya se mencionó, el primer paso para detectar y caracterizar el fenómeno de inversión térmica en el Valle de Aburrá, asociado con la ocurrencia de capas de alta estabilidad atmosférica, consistió en generar gráficas de contorno para los días con información disponible, incluso para aquellos incompletos o con formato diferente (pues sólo 2 días no estaban en los registros). Lo anterior con el objetivo de observar los gradientes de temperatura real con el tiempo, y de ese modo detectar los episodios de inversión y su intensidad aproximada.

Las Figuras 5 y 6 corresponden a dos de las gráficas iniciales, en donde además de las temperaturas, también se incluyó el comportamiento de la humedad relativa en superficie y del indicador de lluvia. Se puede ver cómo en la Figura 5, que representa las temperaturas para el 1 de enero de 2015, no se tiene ningún episodio de inversión o estabilidad, puesto que, de acuerdo con la paleta de colores, en todos los instantes de tiempo la temperatura disminuye con la altura. Por el contrario, en la Figura 6, que representa las temperaturas para el 31 de mayo de 2015, sí se puede apreciar un evento de inversión y de estabilidad atmosférica, entre las 00:00 horas y las 07:00 horas, aproximadamente. En estos días no hubo eventos de precipitación, por lo tanto el indicador de lluvia (línea roja), se mantiene sobre el eje horizontal. Resultados similares pueden consultarse en el Anexo I.

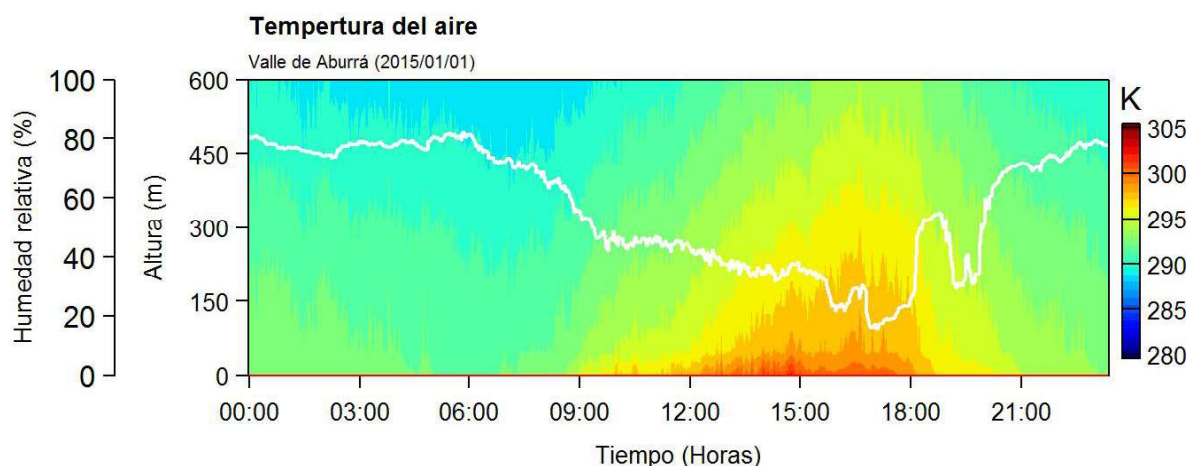


Figura 5: Contornos de temperatura real para el 01/01/2015. La línea blanca corresponde a la humedad relativa superficial y la línea roja al indicador de lluvia.

Este tipo de gráficas también facilita la observación de la relación entre la presencia de lluvia y algunos eventos de inversión, posiblemente asociados a los efectos del agua sobre el equipo de medición. Por ejemplo, en la Figura 7, que corresponde al 1 de mayo de 2016, se puede verificar esta relación. Las líneas verticales rojas representan eventos de precipitación cuya duración corresponde a los momentos en que esa línea está de manera horizontal sobre la margen superior de la figura. Es importante mencionarlo, porque a partir de este primer sondeo, se descartaron del análisis los días con variaciones en la temperatura estrechamente relacionadas con un posible efecto de la lluvia sobre el equipo de medición (pues además correspondían a valores anómalos en la temperatura), por tratarse de condiciones con poca confiabilidad. Esto es clave porque, si bien en otros días hubo precipitación, puede suponerse que ésta no condiciona la ocurrencia de un episodio de inversión, debido al intervalo de tiempo en medio de los dos eventos, tal como sucede en la Figura 8, que corresponde al 30 de julio de 2015.

Esas figuras iniciales permitieron observar que una gran cantidad de episodios de inversión tenían una duración que involucraba la noche y el amanecer de días consecutivos. Se implementaron entonces gráficas con la escala de tiempo comprendida entre las 15:00 horas de un día y las 9:00 horas del siguiente, para los análisis posteriores (resultados similares pueden

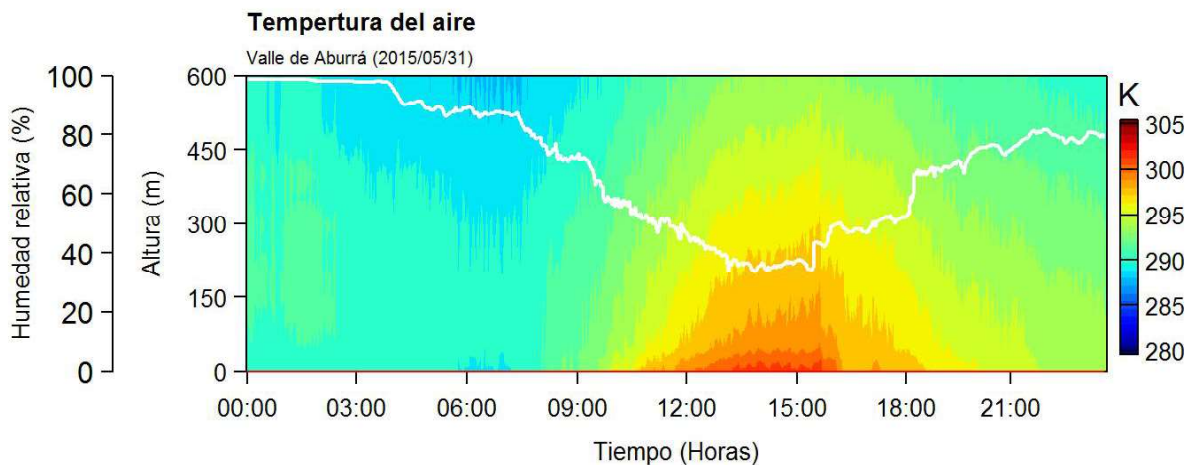


Figura 6: Contornos de temperatura real para el 31/05/2015. La línea blanca corresponde a la humedad relativa superficial y la línea roja al indicador de lluvia.

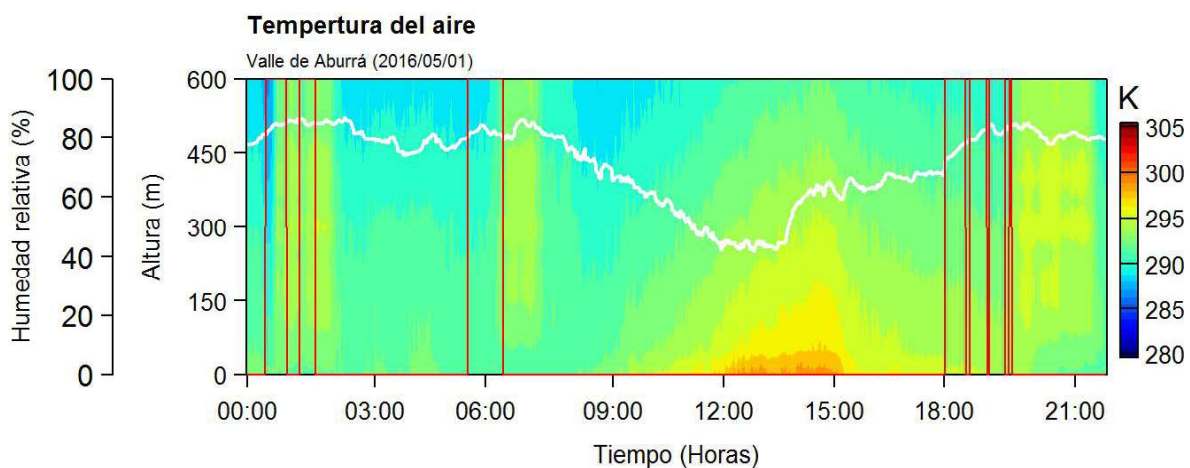


Figura 7: Contornos de temperatura real para el 01/05/2016. La línea blanca corresponde a la humedad relativa superficial y la línea roja al indicador de lluvia.

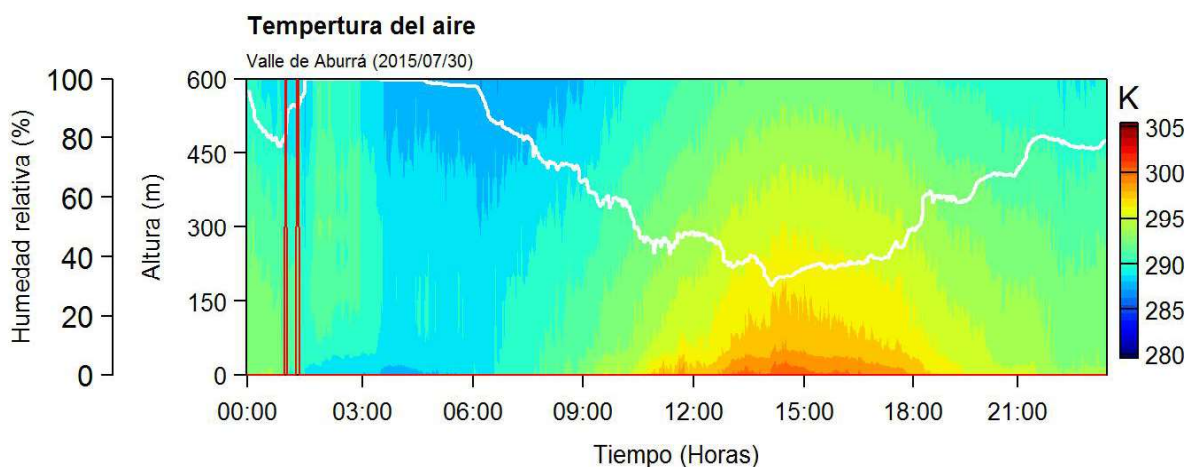


Figura 8: Contornos de temperatura real para el 30/07/2015. La línea blanca corresponde a la humedad relativa superficial y la línea roja al indicador de lluvia.

consultarse en el Anexo II). También, partiendo de esos primeros sondeos, se generaron gráficas con la escala de temperatura con una mayor resolución, visualizando así las características de los episodios. Un ejemplo se presenta en la Figura 9, que corresponde al período comprendido entre el 30 y el 31 de mayo de 2015.

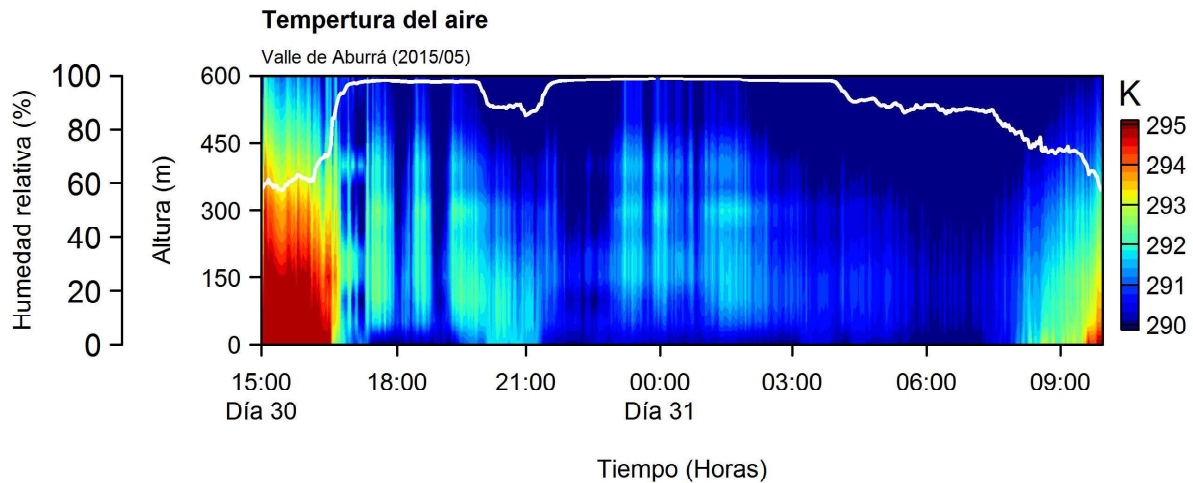


Figura 9: Contornos de temperatura real entre el 30/05/2015 y el 31/05/2015. La línea blanca corresponde a la humedad relativa superficial.

2.4. Detección de eventos de inversión térmica en superficie

La identificación visual de las capas de alta estabilidad es una herramienta útil para la caracterización preliminar, pero no deja de presentar incertidumbres respecto a la exactitud y a la subjetividad de las apreciaciones, y a otros detalles de especial interés en la caracterización de estos eventos, tales como la posición de la base y del tope, la magnitud de los gradientes de temperatura, las horas de inicio y de finalización, y la duración asociada de cada evento. Es por esto que se partió del algoritmo implementado por Henao *et al.* (2017), que permite establecer, con un buen nivel de precisión la variación en el tiempo de los gradientes de temperatura entre niveles consecutivos. Como se mencionó anteriormente, los análisis se centraron en los gradientes positivos de la temperatura real con la altura, con el objetivo de concentrar el estudio en los casos con condiciones de mayor estabilidad atmosférica. Por ejemplo, y de nuevo solo para una identificación visual, se generaron figuras como la Figura 10, que muestra cómo se identifican los gradientes positivos y su relación con estas capas de inversión térmica superficial (resultados similares pueden consultarse en el Anexo III). Este tipo de figura facilita la visualización de cuándo valores más altos de temperatura no se encuentran necesariamente en la capa superficial, lo que define condiciones de inversión térmica.

Para el análisis y caracterización del fenómeno de inversión térmica se definió como criterio de selección de los eventos de alta estabilidad atmosférica, que el evento tuviera una duración igual o superior a una hora, es decir, que se registraran de manera ininterrumpida gradientes de temperatura real positivos, durante por lo menos una hora. Además, se consideró el análisis hasta una altura máxima de 600 m, ya que en este estudio es de especial interés las capas superficiales de alta estabilidad, por su influencia en la calidad del aire. Bajo esos criterios, el algoritmo utilizado para calcular los gradientes en el tiempo se complementó con nuevos procedimientos, que registraban cuántos gradientes positivos consecutivos duraban una hora o más (recordando que la resolución de la toma de datos es de 2 minutos), entre qué niveles, a qué hora comenzaban a registrarse y a qué hora terminaba la ocurrencia de los mismos. También se analizó, a lo largo del intervalo de ocurrencia, cuáles eran los niveles inferior y superior de la capa de inversión. Como en este proceso es fundamental que la información esté completa y

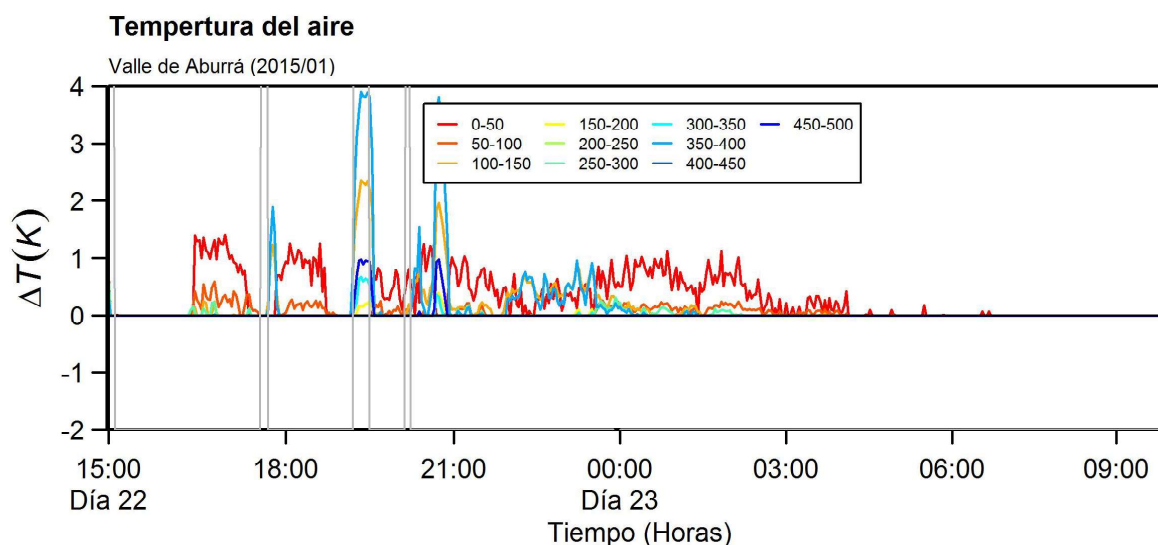


Figura 10: Gradientes positivos de temperatura real en diferentes alturas entre el 16/05/2015 y el 17/05/2015. La línea gris corresponde al indicador de lluvia.

legible, se analizó un total de 595 días, después de descartar aquellos que estuvieran incompletos o con un formato diferente en las lecturas.

Así, se pudo obtener información para caracterizar cada uno de los eventos de inversión asociados a capas de alta estabilidad: la altura de la base y la altura del tope para cada instante de tiempo, el espesor (diferencia entre la altura del tope y la altura de la base), la hora de inicio, la hora de finalización, y con estas últimas, su duración. De esta manera, al tener la posición de la base y del tope en cada instante de tiempo, de los registros de temperatura se podía obtener también la temperatura de la base y del tope, para cada uno de esos instantes. Esto permitió generar otras figuras para todos los días analizados, presentando las series de tiempo de la temperatura, la altura de la base y del tope de la inversión, en los casos en los que se presentaron condiciones de alta estabilidad atmosférica (resultados similares pueden consultarse en el Anexo IV). En la Figura 11, que corresponde al período de tiempo comprendido entre el 30 y el 31 de mayo de 2015, se puede observar la interacción entre esas cuatro variables, pudiéndose identificar las diferencias de temperatura entre la base y el tope, así como su posición en el tiempo, sirviendo además para identificar el patrón de rompimiento de la capa de inversión, que en este caso claramente se puede asociar al descenso del tope. De acuerdo con lo observado en la figura, la temperatura del tope es siempre más alta que la de la base, lo que es consistente con la ocurrencia de inversiones térmicas. En relación con la evolución de la capa de inversión, puede verse como la línea verde (tope) muestra variación durante todo el intervalo de tiempo, pero alrededor de las 07:00 am tiende a cero, es decir, muestra el descenso del tope de la capa de inversión hacia la superficie.

Se encontraron 308 eventos de capas de alta estabilidad atmosférica, con una duración de por lo menos una hora. Este inventario se complementó con la información del indicador de precipitación, identificando en cuáles de esos eventos había presencia de lluvia, siendo un aspecto de suma importancia, porque se pudo verificar que 61 de esos eventos estaban sugerentemente condicionados por el efecto de la precipitación en el equipo de medición (por lo general, exhibiendo temperaturas anómalas muy altas), por lo que también se omitieron del análisis y caracterización de la inversión. Por lo tanto, finalmente se analizaron 247 eventos de alta estabilidad atmosférica para la caracterización del fenómeno de inversión térmica en el Valle de Aburrá.

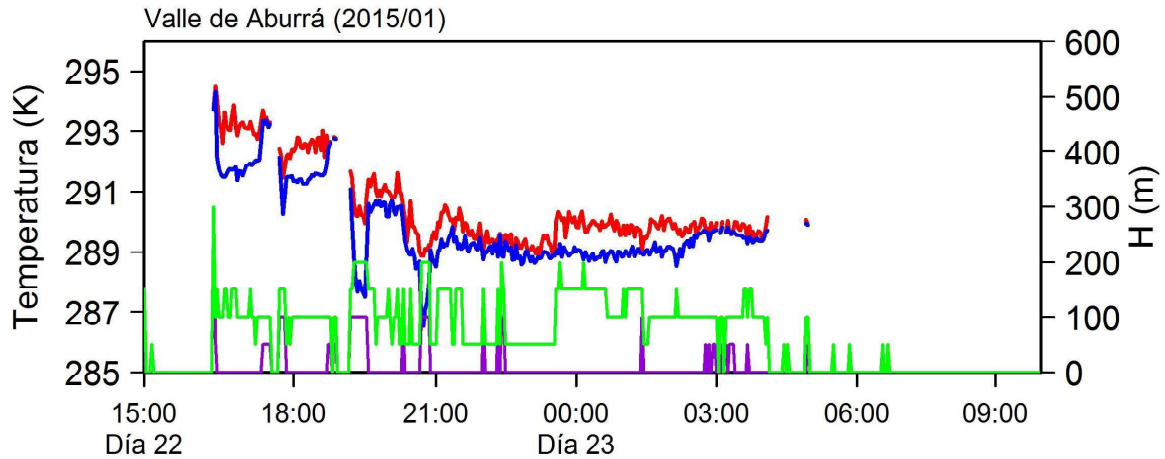


Figura 11: Comportamiento de la capa de alta estabilidad en el tiempo entre el 30/05/2015 y el 31/05/2015: Temperatura real del tope y de la base (rojo y azul, respectivamente). Altura del tope y de la base (verde y violeta, respectivamente).

2.5. Humedad relativa

De los datos registrados por el radiómetro, también se analizaron los perfiles de humedad relativa y su relación con los eventos de inversión detectados. Inicialmente se generaron gráficas de contorno para todos los días con información disponible, en concordancia con la resolución espacial y temporal de los datos de humedad (resultados similares pueden consultarse en el Anexo V). Por ejemplo, en la Figura 12, que corresponde a las humedades relativas entre el 30 y el 31 de mayo de 2015, se puede observar los gradientes para esta variable, estrechamente relacionados con las horas de sol para el Valle de Aburrá y con el evento de alta estabilidad atmosférica detectado en el mismo período de tiempo (Figura 9).

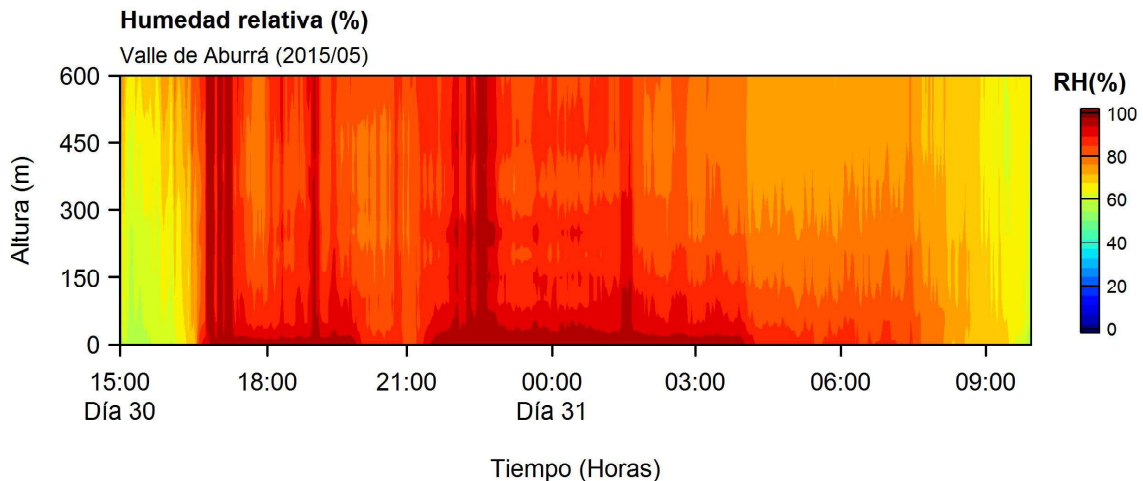


Figura 12: Contornos para la humedad relativa (%) entre el 30/05/2015 y el 31/05/2015.

Con esa información, para cada día se analizaron los valores máximo y promedio exhibidos por la humedad relativa, así como la relación existente con la ocurrencia (o no) de capas de alta estabilidad atmosférica con duración mínima o igual a 1 hora. Estudios previos sugieren una estrecha relación entre las capas de estabilidad atmosférica y el incremento de la humedad relativa (Wang *et al.*, 2015; Yasmeen, 2011), por lo que, siendo el Valle de Aburrá un valle tropical y relativamente húmedo, este análisis es muy valioso para la caracterización del fenómeno de inversión térmica y sus efectos sobre las condiciones de la baja atmósfera local.

2.6. Datos de la calidad del aire

Por otro lado, se obtuvo información correspondiente a los registros de las concentraciones de la variable PM_{2.5}, para el mismo período de tiempo, de las estaciones de calidad del aire del sistema SIATA, identificadas como “Museo de Antioquia” (Estación N° 12) y “Universidad Nacional - Núcleo El Volador” (Estación N° 25), que corresponden a dos estaciones que se consideran representativas para el eje central del valle, además de ser las más cercanas a la torre SIATA.

Esta información se depuró, procesó e incorporó a la base de datos de los registros del radiómetro, a través de algoritmos en el lenguaje de programación R. Teniendo en cuenta que la resolución temporal de esta información es menor (1 hora), para este análisis se promediaron los valores de la temperatura, con el fin de tener la información para instantes comparables. Todo esto con el objetivo de analizar los efectos de la dinámica de la atmósfera local usando como referente información de calidad del aire, y así, plantear una discusión sobre las implicaciones de las capas de alta estabilidad en la concentración de contaminantes atmosféricos, y de manera consecuente, en la calidad del aire.

Se eligió la variable PM_{2.5}, que como ya se dijo, es un buen indicador de la contaminación urbana, al provenir de las emisiones de los vehículos e industrias en la ciudad, que en el caso del Valle de Aburrá son las fuentes predominantes (AMVA-UPB, 2017). Además, porque representa las partículas más complejas para la salud de la población, de acuerdo con lo expuesto en la sección anterior.

En las Figuras 13 y 14 se muestra la evolución de la variable PM_{2.5} en relación con el contorno de temperatura, para el día 23 de julio de 2015 en las estaciones Museo de Antioquia y Universidad Nacional - Núcleo El Volador, respectivamente. En estos resultados, se observa una relación entre condiciones de estabilidad atmosférica o inversión térmica, con un incremento en la concentración de estos contaminantes, particularmente en el periodo comprendido entre las 3:00 am y las 9:00 am (en este caso se reconoce como una parte del contorno en la que en el tiempo no hay variación de la temperatura con la altura). Este tipo de figuras permiten establecer patrones de comportamiento de las emisiones de PM_{2.5}, de acuerdo con el comportamiento de la temperatura atmosférica (resultados similares pueden consultarse en los Anexos VI y VII).

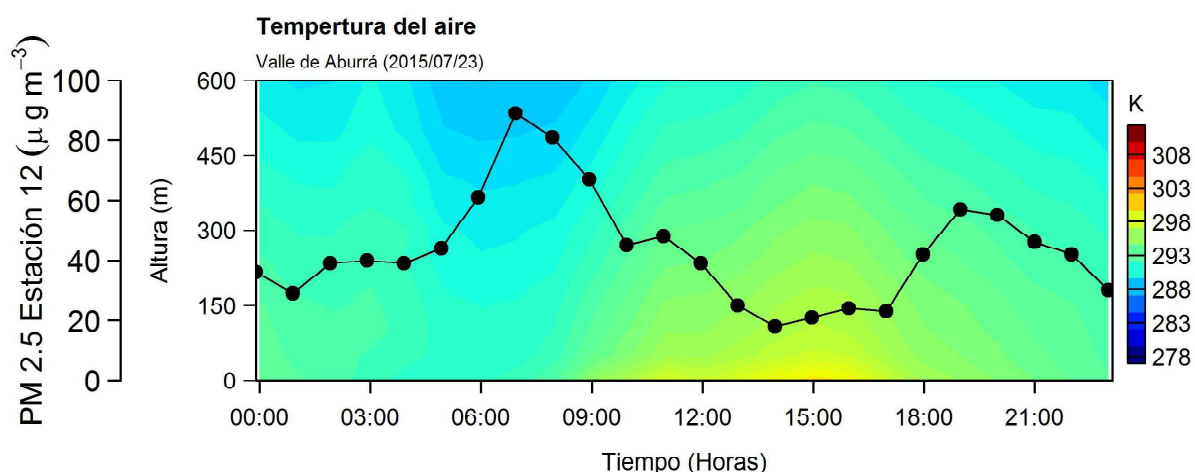


Figura 13: Contornos de temperatura real y PM 2.5 en la estación “Museo de Antioquia” (Línea punteada). Fecha: 23/07/2015.

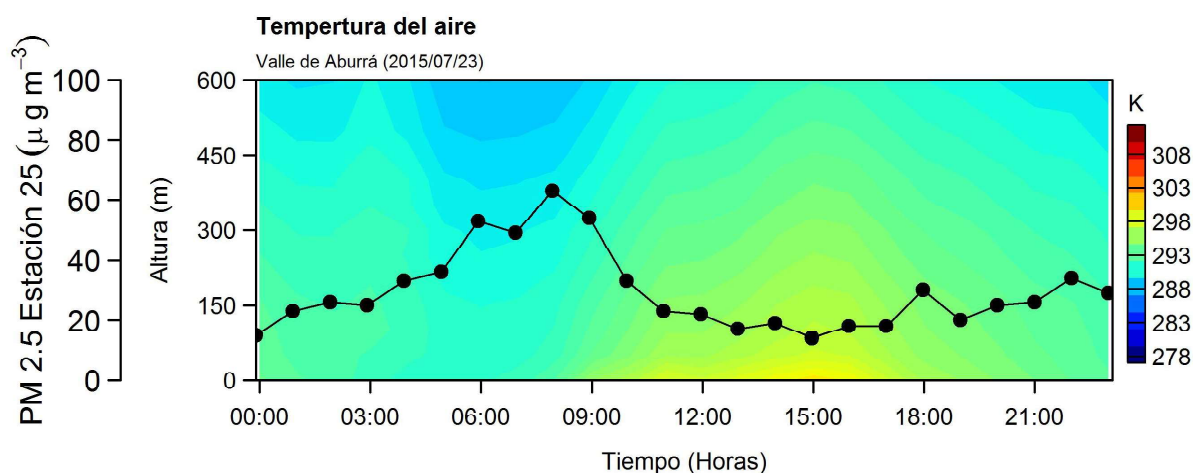


Figura 14: Contornos de temperatura real y PM 2.5 en la estación “Universidad Nacional – Núcleo El Volador” (Línea punteada). Fecha: 23/07/2015.

3. Resultados

De los análisis realizados de acuerdo con los numerales presentados en la sección anterior, es posible decir que la inversión térmica asociada a capas de alta estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá, de manera general, exhibe las siguientes características: i) el proceso de formación ocurre entre las 10:00 pm y las 3:00 am, y el de rompimiento entre las 5:00 am y las 7:00 am, ii) el rompimiento de la capa de inversión ocurre típicamente por el descenso del tope o por la combinación entre el descenso del tope y el ascenso de la base de la inversión (CBL), iii) el espesor máximo de las capas de inversión más superficiales es alrededor de 200 m, y iv) la duración de los eventos de inversión oscila entre las 2 y 4 horas.

El análisis de los 247 eventos seleccionados muestra que, para el Valle de Aburrá, hay una variabilidad estacional intra anual en la ocurrencia de estos eventos, siendo los meses de abril-mayo, julio y octubre, aquellos en los que se tiene una mayor frecuencia, cercana o superior a los 15 eventos por mes (ver Figura 15). Por el contrario, los meses de enero, febrero y marzo son en los que se tiene una menor cantidad de eventos de inversión. Este comportamiento estacional puede estar relacionado con el viaje de la ZCIT sobre Colombia y en particular sobre el valle, que cambia las condiciones de nubosidad y de radiación incidente, alterando el balance de energía en superficie y en atmósfera, y por tanto, la cantidad de flujo de calor sensible superficial, que es quien modula el proceso de formación y rompimiento de la inversión térmica. De manera particular, se resalta que gran parte de los meses en los que la ocurrencia del fenómeno es mas frecuente, están asociados con condiciones de alta nubosidad sobre la región. La presencia de nubes limita tanto el paso de la radiación hacia la superficie como el intercambio de masa desde la superficie, restringiendo los transportes verticales y dando lugar a condiciones de estabilidad e inversión térmica en las primeras capas de la atmósfera. Sin embargo, es importante resaltar la alta frecuencia de eventos de inversión en julio, que es un mes típicamente seco y despejado sobre la región de estudio. La alta frecuencia del fenómeno en este mes puede asociarse, de manera contraria a los casos anteriores, con cielos muy despejados que pueden favorecer y fortalecer intercambios de masa y energía entre la superficie y la atmósfera, dando lugar a enfriamientos superficiales más pronunciados en las horas de la noche y por lo tanto, a la formación de capas de inversión en las primeras capas de la atmósfera.

De acuerdo con los resultados presentados en la Figura 16, los eventos ocurridos durante el año 2015 exhiben una mayor duración en comparación con aquellos ocurridos en el 2016. Es de resaltar que en general los datos presentan gran dispersión y asimetría en el comportamiento anual, lo que puede explicarse en términos de la baja ocurrencia del fenómeno en algunos meses.

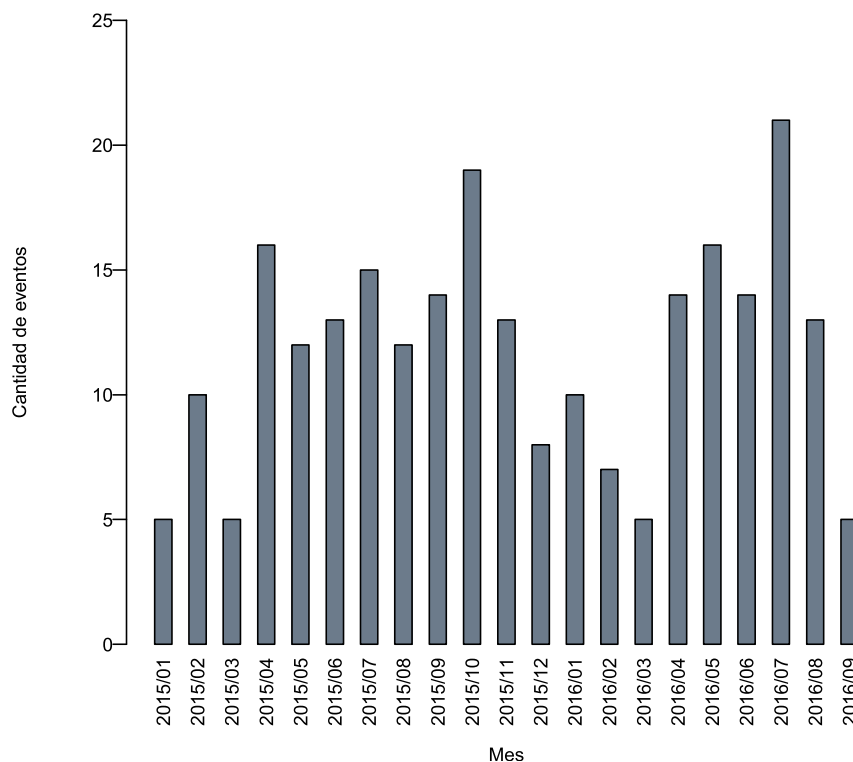


Figura 15: Distribución anual de la cantidad de eventos de inversión analizados.

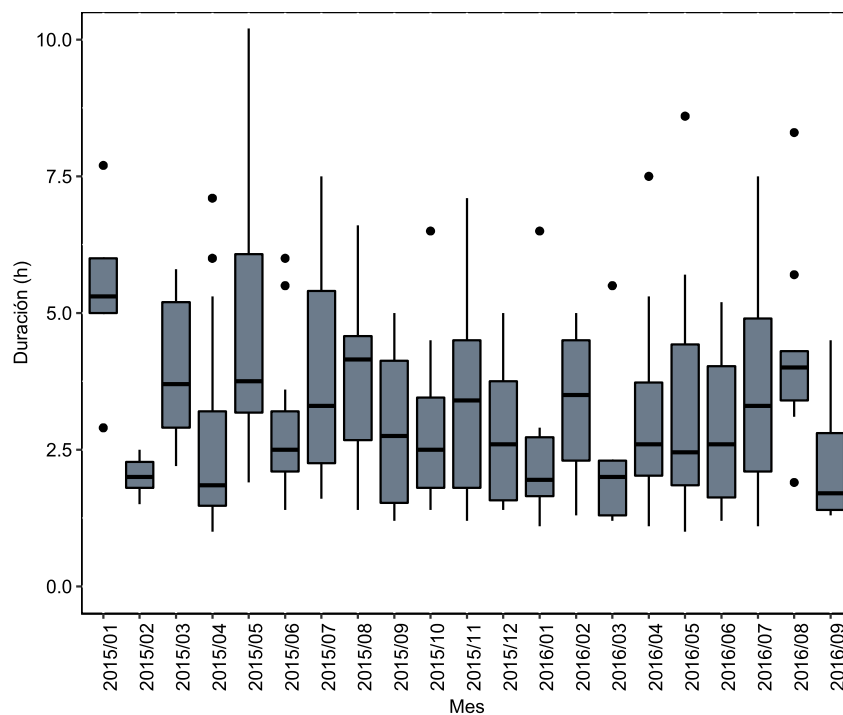


Figura 16: Distribución anual de la duración de los eventos de inversión analizados.

En este sentido, en los meses de enero, marzo y julio de 2015, y mayo y julio de 2016, se tiene una mayor representatividad en la ocurrencia de los eventos de mayor duración. Se tienen también algunos casos puntuales de duraciones muy por encima del comportamiento general y que por lo tanto no se consideran representativos, como el mes de mayo de 2016, en donde hay

un outlier, correspondiente a una duración de 20 horas. No obstante y de acuerdo con el análisis de toda la muestra, la media global en la duración de los eventos es cercana a las 2 horas.

En la Figura 17 se muestra la frecuencia con la que ocurren diferentes duraciones (aproximadas a horas enteras, entendiéndose como la reducción de las cifras significativas de la duración en horas). En estos resultados también puede observarse que aproximadamente el 35% de los datos tiene una duración cercana a las 2 horas, y que sólo un 2% de los eventos sobrepasan las 8 horas de duración. Además, que la duración más frecuente obtenida de la muestra de datos oscila entre 1 y 4 horas.

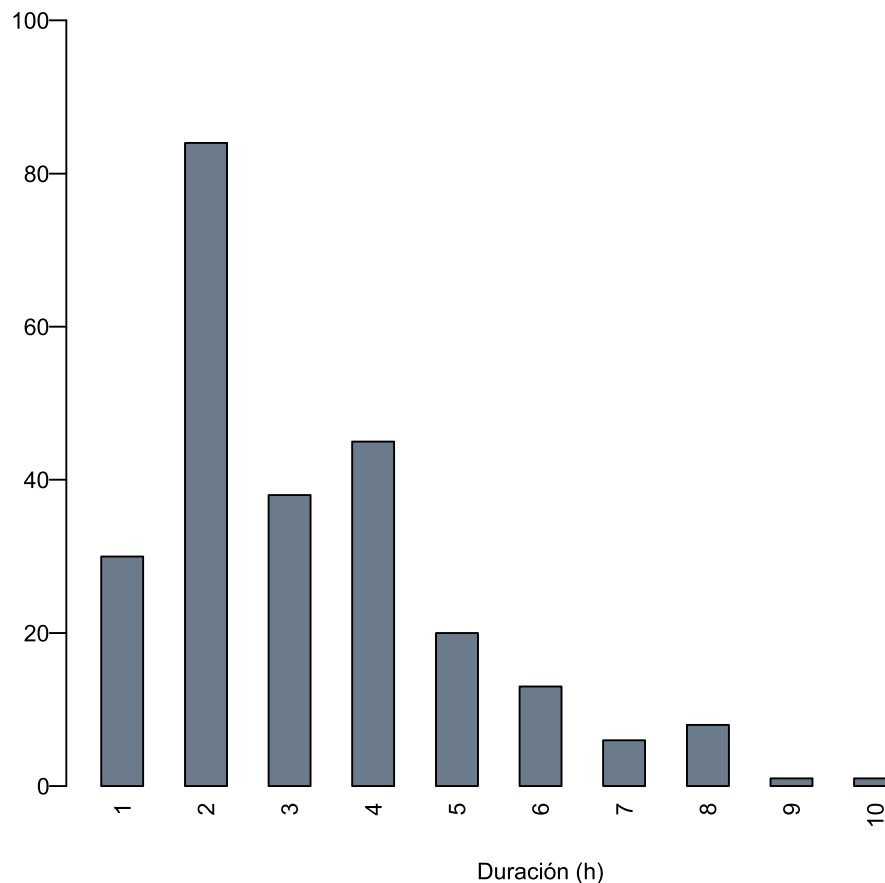


Figura 17: Frecuencias para diferentes duraciones de los eventos de inversión analizados.

Con respecto al espesor de las capas de inversión, las más superficiales suelen tener un espesor que va como máximo hasta los 200 *m*, que es donde se presentan los mayores gradientes de temperatura. Sin embargo, en muchos eventos la capa estable suele ser mayor, incluso hasta alcanzar los 600 *m*, e involucra subcapas en las cuales los gradientes, aunque positivos, no son tan fuertes como los registrados en las capas de la atmósfera más próximas a la superficie. En ese sentido, la Figura 18 muestra la distribución anual de los espesores medios para todas las capas observadas, desde la superficie y hasta 600 *m*.

Este trabajo se concentra en las capas más superficiales, que son las que exhiben los gradientes más fuertes y que están en contacto con la superficie, por lo que su incidencia en la calidad del aire es más representativa. Teniendo en cuenta que el espesor de las capas de inversión evoluciona con el tiempo, se calculó el espesor máximo experimentado durante cada uno de los eventos de inversión, con el objetivo de dimensionar la magnitud de estas capas, y su variabilidad en el ciclo anual, como se presenta en la Figura 19. De los resultados presentados en la figura, puede decirse que en promedio el espesor es cercano a los 120 *m* y que no son evidentes patrones de estacionalidad en esta distribución. Sin embargo, se señala la gran dispersión y asimetría en los datos, situación que en muchos casos se relaciona con que en algunos meses se presentaron

pocos eventos de inversión. Llama la atención que los eventos registrados en el 2016 tienen un mayor espesor que los del año 2015. Los meses julio y noviembre de 2015, y julio y agosto de 2016, son los que exhiben mayor representatividad en espesores mayores de la capa de inversión.

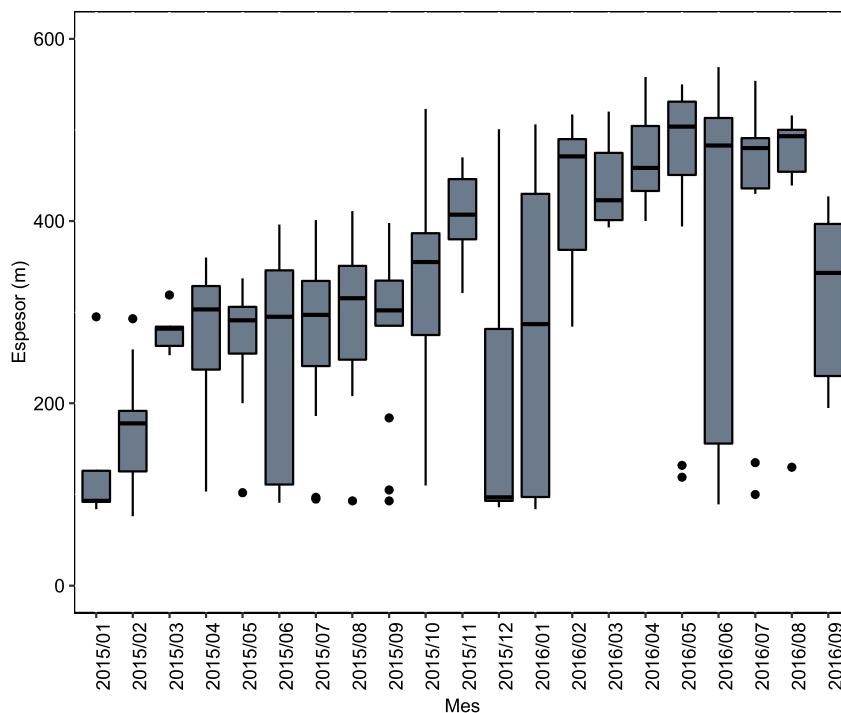


Figura 18: Distribución anual del espesor de las capas de inversión analizadas.

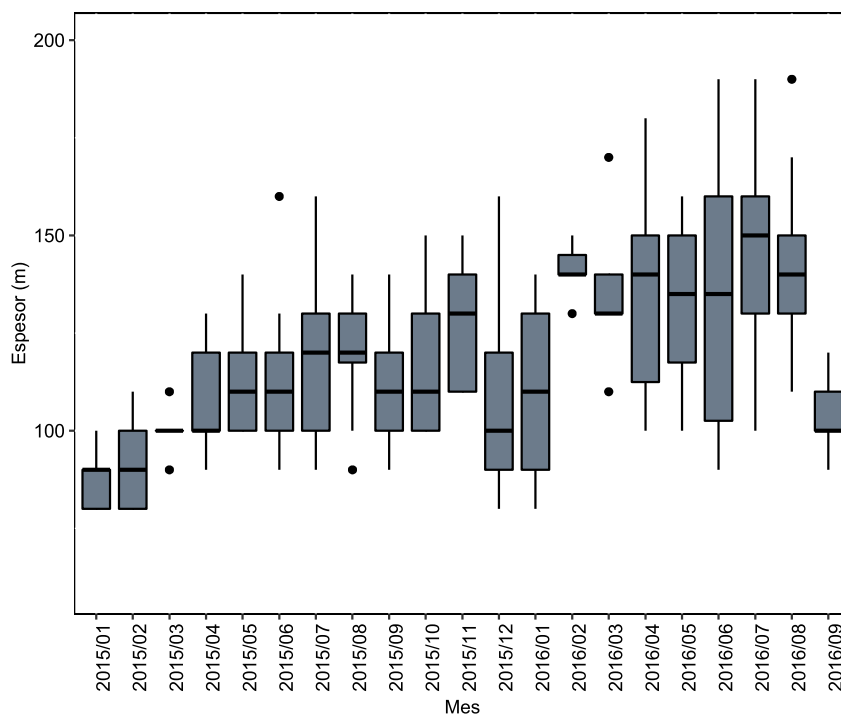


Figura 19: Distribución anual del espesor de las capas de inversión analizadas.

3.1. Caracterización del proceso de formación

Lo primero en lo que se piensa cuando se busca caracterizar la formación de las capas de alta estabilidad atmosférica, es determinar la hora en la que suelen iniciar estos eventos, es decir, cuando se comienzan a registrar gradientes verticales positivos de temperatura. Para los datos analizados se obtuvieron las Figuras 20 y 21, que muestran la frecuencia en el inicio de los eventos (aproximado a la hora en punto más cercana) y el rango horario del día en el que ocurren los procesos de formación (se definen 4 rangos para esta clasificación: 3:00 am - 9:00 am, 9:00 am - 3:00 pm, 3:00 pm - 9:00 pm, y 9:00 pm -3:00 am). Se observa que es común que en el Valle de Aburrá las capas de inversión se formen entre el final de la noche y el principio de la madrugada (principalmente entre las 9:00 pm y las 3:00 am). Llama la atención que sea en ese horario en donde los meses con mayor cantidad de eventos de inversión tengan una mayor representatividad, aspecto que puede estar relacionado con el hecho de que como hay más inversiones detectadas en esos meses, hay más datos de formación a esas horas. Así mismo, que el mes de octubre sea el único en el que la mayoría de los eventos registrados comienzan a formarse entre las 9:00 am y las 3:00 pm, es decir, en el transcurso de la mañana y no de la madrugada o la noche.

Además, es poco usual que entre las 6:00 am y las 5:00 pm se formen eventos de inversión. Esto puede explicarse en términos de los procesos termodinámicos que suceden en la atmósfera como resultado de la radiación solar incidente. En las horas de mayor radiación se genera mayor turbulencia térmica y dinámica, lo que favorece el mezclado de la baja atmósfera y por tanto restringe la formación de capas estables y/o de inversión térmica. Es claro que no todos los días se forman capas de inversión, sin embargo es de resaltar la alta frecuencia en su ocurrencia sobre todo en ciertos meses del año como julio, lo que evidencia la relevancia del fenómeno en la dinámica de la atmósfera local y en los procesos de ventilación y transporte en el Valle.

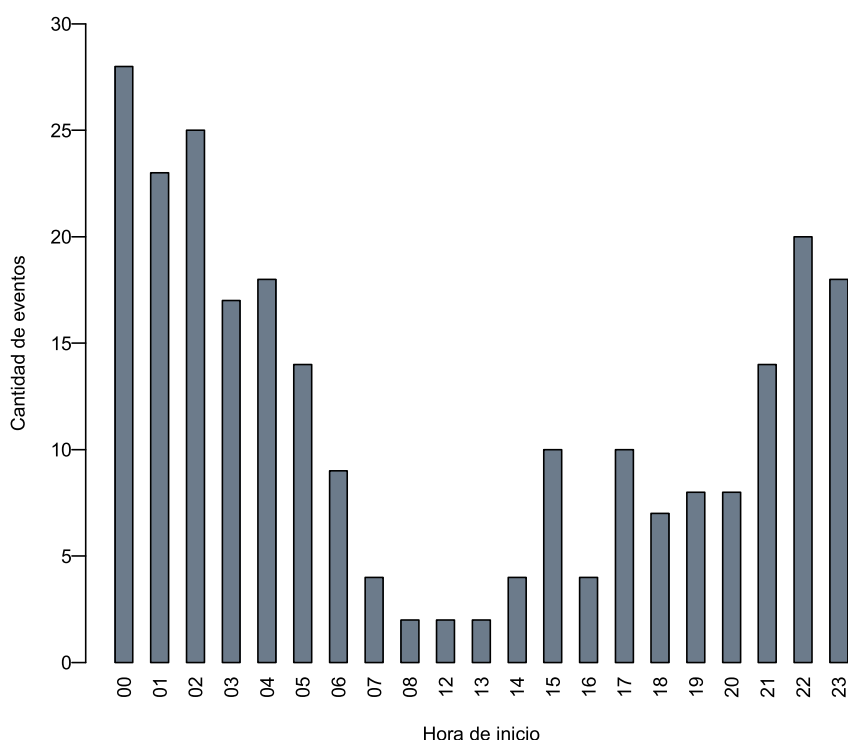


Figura 20: Frecuencias de las horas de inicio de los eventos de inversión analizados.

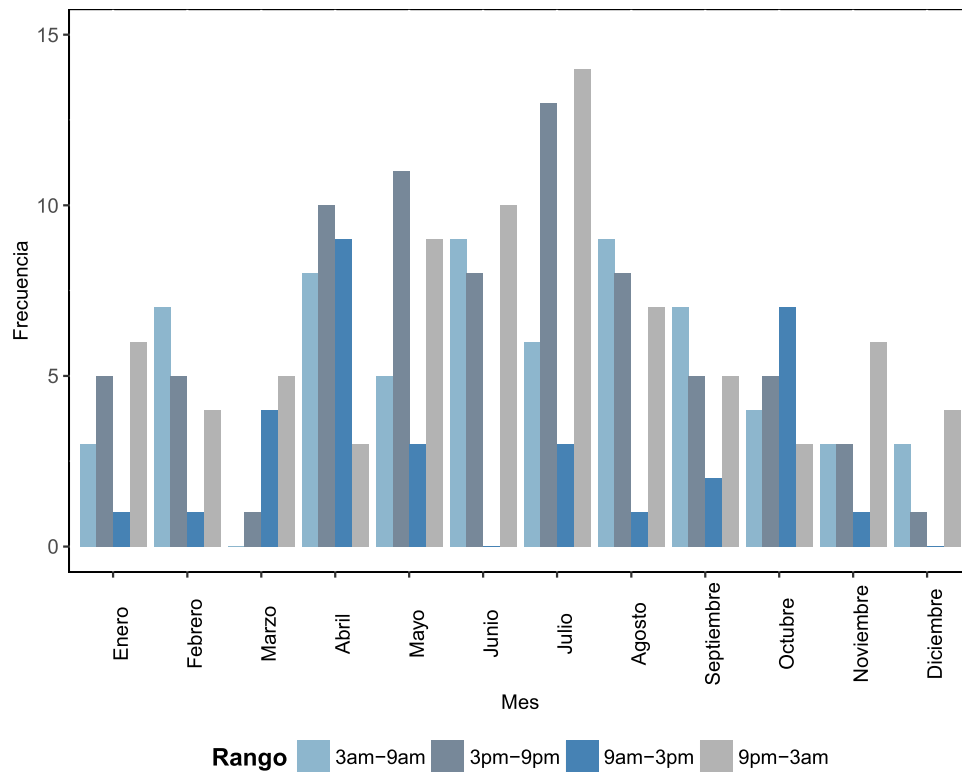


Figura 21: Rango de tiempo de inicio de los eventos de inversión analizados.

3.2. Caracterización del proceso de rompimiento

Como sucede en la caracterización del proceso de formación, en el proceso de rompimiento es fundamental determinar la hora del día en la que desaparecen los gradientes verticales positivos de temperatura que caracterizan cada evento de inversión. Para esto, se construyó la Figura 22, que muestra la frecuencia en la hora de finalización de los eventos (aproximado a horas), bajo los criterios establecidos para esta investigación. Del análisis de la información, se encontró que el proceso de rompimiento de las capas de inversión tiene lugar con mayor frecuencia después del amanecer, aproximadamente entre las 5:00 am y las 7:00 am. No obstante, hay casos en los cuales el rompimiento sucede en otras horas de la mañana, siendo poco usual encontrar procesos de rompimiento entre las 8:00 am y las 10:00 pm.

En la Figura 23 puede verse el rango horario del día en el que tiene lugar el proceso de rompimiento de las capas de inversión (se definen 4 rangos para esta clasificación: 3:00 am - 9:00 am, 9:00 am - 3:00 pm, 3:00 pm - 9:00 pm, y 9:00 pm - 3:00 am). De manera consecuente con los análisis de la Figura 22, se observa que en la mayoría de los meses el proceso de rompimiento tiene lugar en el rango comprendido entre las 3:00 am y las 9:00 am, que coincide con el amanecer y el efecto de la radiación solar sobre la superficie y la baja atmósfera. Así mismo, se observa que son pocos los eventos de rompimiento que se dan entre las 9:00 am y las 3:00 pm, que coincide con el período de máxima radiación y mayor turbulencia térmica en la baja atmósfera del Valle. Es de resaltar que en los meses de abril y octubre sea representativo el rango horario comprendido entre las 3:00 pm y las 9:00 pm para la ocurrencia de procesos de rompimiento. El rompimiento de las capas estables en este rango de horas, puede explicarse en términos de que la radiación solar que alcanza la superficie durante del día es típicamente menor, gracias a una mayor cobertura de nubes sobre el Valle, característica muy propia de estos meses de lluvias en la región. Esta limitante en la radiación solar disminuye el desarrollo de turbulencia térmica y el desarrollo de la capa límite convectiva, lo que lleva a una persistencia de las capas de inversión cerca de la superficie.

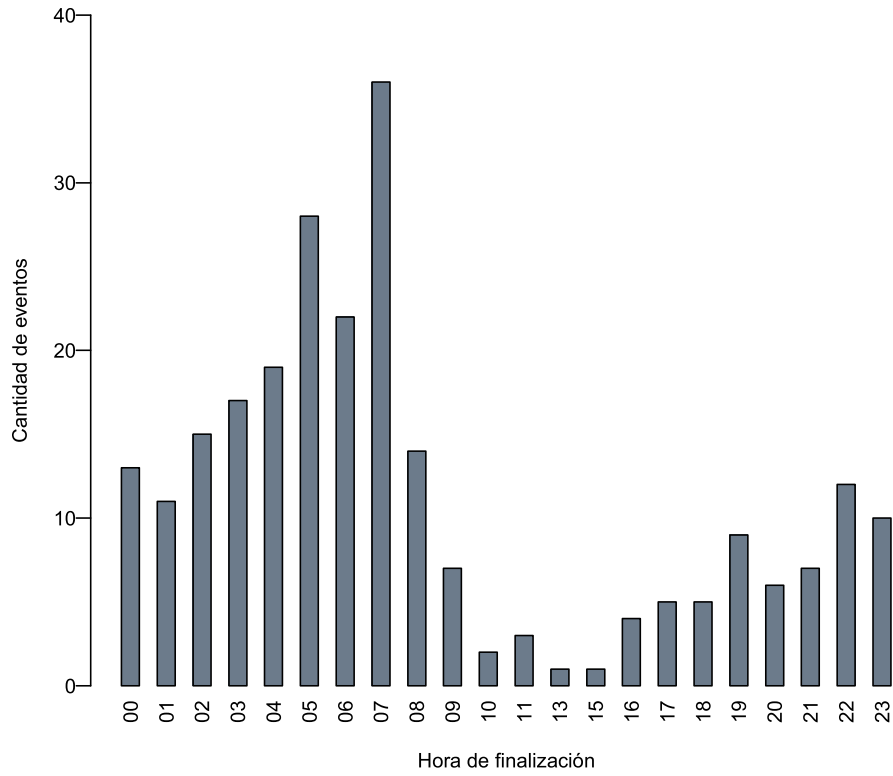


Figura 22: Frecuencias de las horas de finalización de los eventos de inversión analizados.

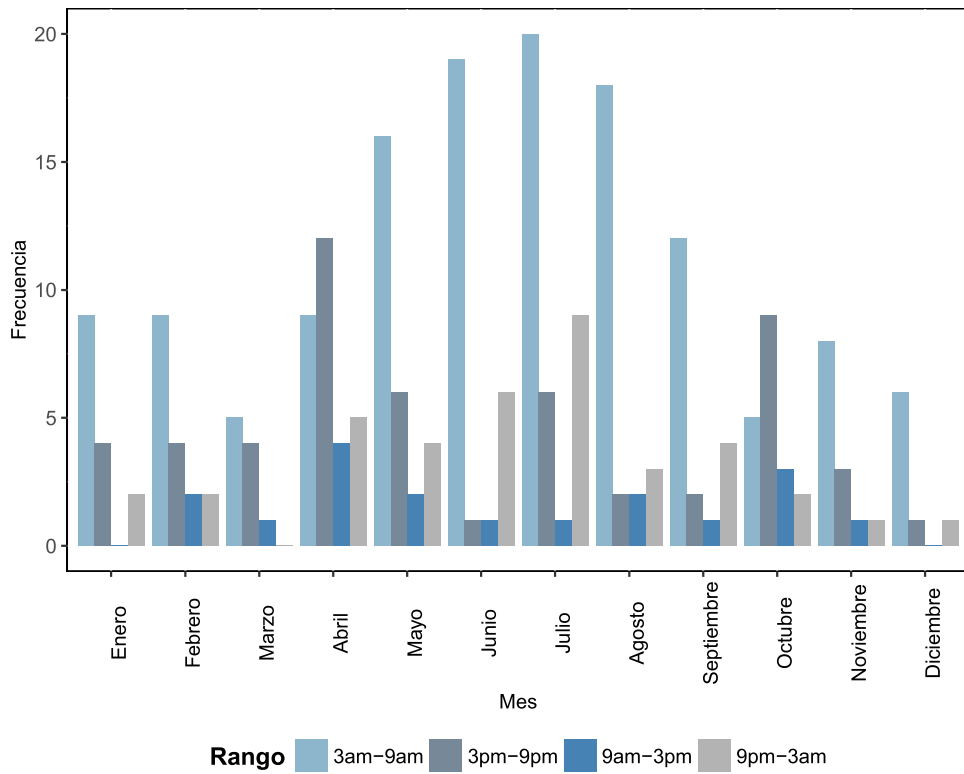


Figura 23: Rango de tiempo para el rompimiento de los eventos de inversión analizados.

Otro de los aspectos fundamentales para la caracterización del rompimiento de los eventos de inversión, es la detección de los patrones que conducen a la desaparición de la capa estable de acuerdo con los patrones establecidos en la literatura (Whiteman, 1990, 1982).

En la literatura reportada se mencionó que, para valles no urbanizados, en altas latitudes y bajo condiciones de escasa humedad, se han establecido tres posibles patrones para el rompimiento: (i) La formación de una capa límite convectiva (CBL), que para efectos prácticos se caracteriza por el ascenso en el tiempo de la base de la inversión, hasta que alcanza la altura del tope; (ii) el descenso en el tiempo del tope de la inversión, hasta que alcanza la altura de la base; (iii) un efecto combinado entre el descenso del tope y el ascenso de la base, hasta que convergen. En los 247 eventos analizados, se pudo establecer que en el Valle de Aburrá, que es altamente urbanizado, localizado en el trópico y con condiciones de alta humedad atmosférica, los patrones predominantes en el rompimiento de las capas de inversión son los patrones (ii) y (iii), es decir el descenso del tope, y la combinación entre el crecimiento de la CBL y el descenso del tope (como se muestra en la Figura 24). Específicamente el que más se presenta es el de la combinación de patrones, que se evidenció en un 57% de todos los casos estudiados.

Para caracterizar las capas de inversión, también se evaluó la estacionalidad en la ocurrencia de estos patrones de rompimiento, que corresponde a la distribución anual de los patrones identificados, como se presenta en la Figura 25. Lo primero que se observa es que, de manera general, en los eventos del año 2015 el patrón dominante en el proceso de rompimiento fue el patrón (i), es decir, el descenso del tope de la inversión, mientras que, en el año 2016 predomina la combinación de patrones en el proceso de rompimiento. No parece haber una tendencia en la variación estacional con la que ocurren los diferentes patrones de rompimiento identificados.

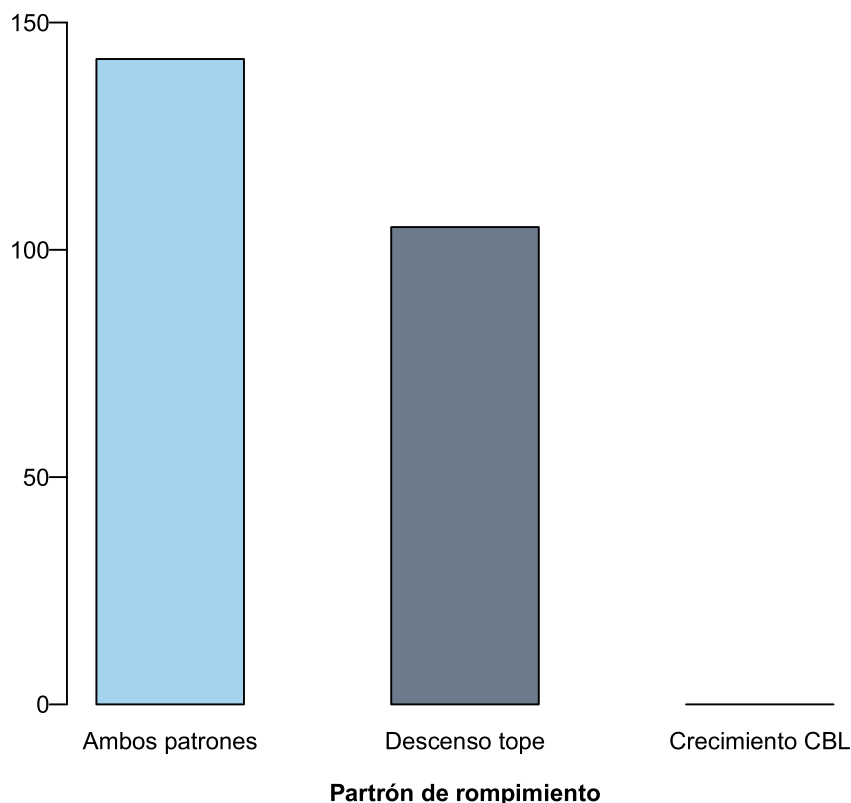


Figura 24: Comportamiento de los patrones de rompimiento de los eventos de inversión analizados.

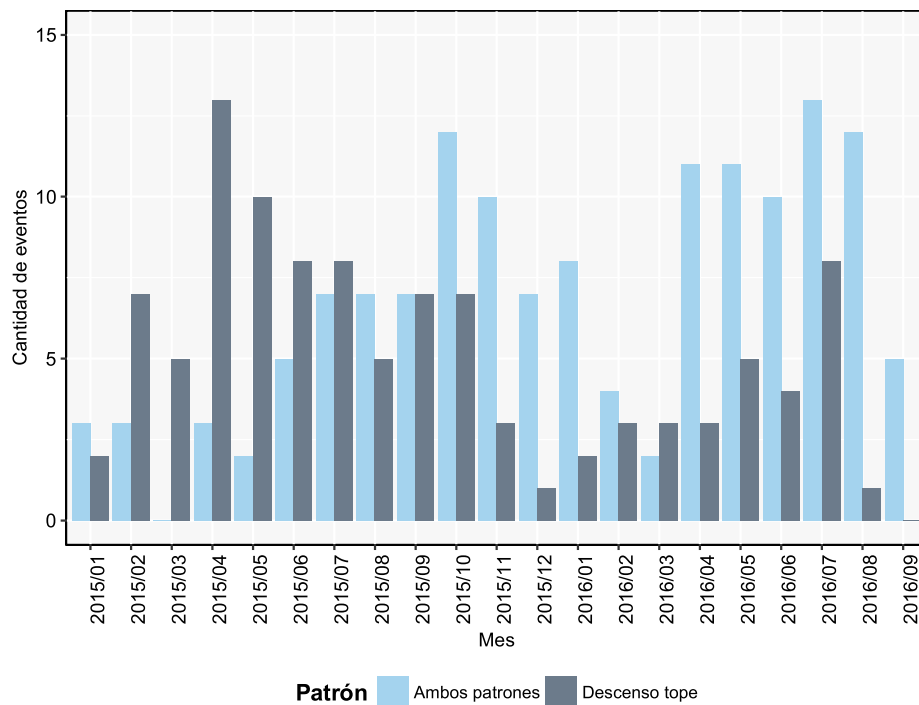


Figura 25: Distribución anual de los patrones de rompimiento de los eventos de inversión analizados.

3.3. Humedad relativa

Cada una de las gráficas de contorno generadas para la humedad relativa se comparó respectivamente con cada una de las gráficas de contorno de la temperatura real presentadas anteriormente. De esta comparación se puede establecer una clara relación entre la ocurrencia de capas de alta estabilidad y altos valores de humedad relativa. Por ejemplo, la Figura 26 corresponde a los gradientes de humedad relativa para el 30 de julio de 2015.

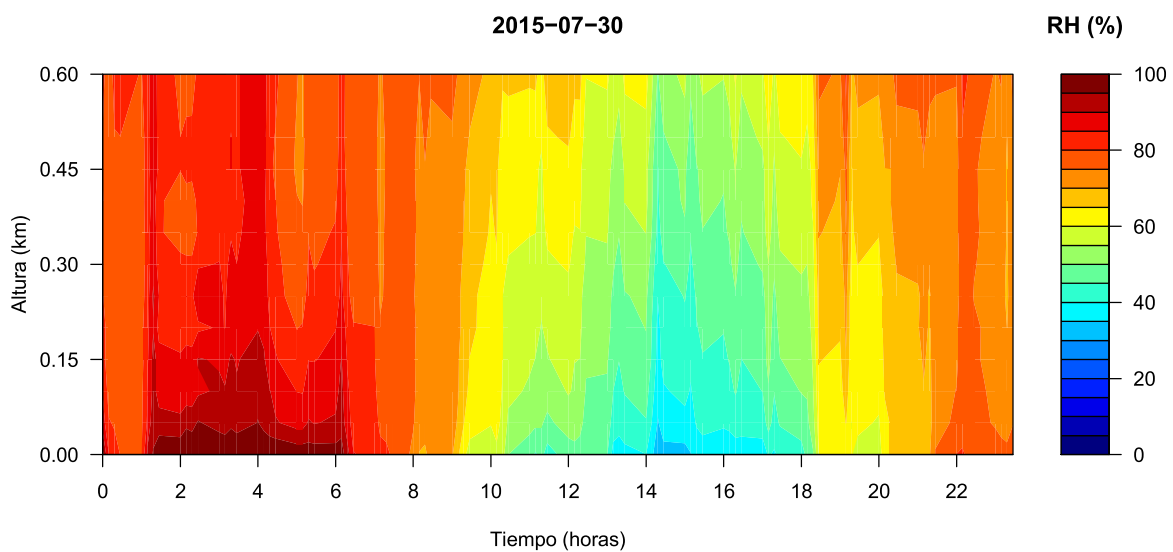


Figura 26: Contornos para la humedad relativa (%) para el 30/07/2015

Si este comportamiento de la humedad relativa se compara con lo observado anteriormente en la Figura 8, que corresponde a los gradientes de temperatura real para el mismo día, y en la que se detectó una capa de alta estabilidad que evoluciona en las primeras 8 horas de ese día, se puede apreciar un incremento en la humedad relativa en esas mismas 8 horas, especialmente para las alturas más cercanas a la superficie.

Para profundizar en el análisis y cuantificar los incrementos en la humedad relativa durante los eventos de inversión térmica, y posteriormente compararlos con aquellos momentos en los que no hubo inversión, se obtuvo el valor promedio para la humedad relativa diaria y para la humedad relativa máxima diaria. En la Tabla 2 se resumen estos valores, los cuales reflejan una tendencia creciente para los valores promedios y máximos de la humedad relativa cuando existen capas de alta estabilidad atmosférica, en comparación con los momentos de no inversión. Estos resultados evidencian el efecto limitante de las capas estables sobre los transportes verticales de masa en la baja atmósfera. Estas condiciones de transporte limitado se consideran importantes en un valle montañoso y tan densamente poblado como el valle de Aburrá.

Tabla 2: Promedios para la humedad relativa diaria promedio y máxima (%) para horas de inversión y horas de no inversión

Condición	RH(%) Promedio	RH(%) Máxima
Horas de No inversión	63.46	86.50
Horas de Inversión	85.16	94.60

Por otra parte, en la Tabla 3, se resumen los promedios trimestrales para la humedad relativa promedio y máxima, distinguiendo entre los momentos en que ocurrieron y los que no, eventos de alta estabilidad atmosférica. De ese modo, se observa una estacionalidad trimestral, muy relacionada con la distribución bimodal de la precipitación en el Valle de Aburrá, en la que los mayores valores de humedad relativa se tienen en el segundo y en el cuarto trimestre del año (época de lluvias), siendo además consistentes estos resultados con los descritos anteriormente, en donde en los momentos de inversión se tienen mayores valores de humedad si se compara con los momentos de no inversión térmica.

Tabla 3: Promedios para la humedad relativa diaria promedio y máxima (%) para horas de inversión y horas de no inversión, para diferentes trimestres del año

Trimestre	Horas de No inversión		Horas de Inversión	
	RH(%) Prom.	RH(%) Máx.	RH(%) Prom.	RH(%) Máx.
D-E-F	63.24	85.04	81.83	90.16
M-A-M	65.88	88.21	87.77	97.18
J-J-A	59.71	84.04	83.32	93.40
S-O-N	66.49	90.12	88.64	97.63

3.4. Calidad del aire

Con respecto a la base de datos del material particulado inhalable (PM_{2.5}), para cada una de las estaciones seleccionadas se verificó el comportamiento mensual de las concentraciones diarias de PM_{2.5}, con el fin de evaluar el estado de la calidad del aire del Valle de Aburrá, así como su relación con la ocurrencia de inversiones térmicas.

De ese modo, se construyó la Figura 27, que corresponde a la distribución anual de las concentraciones diarias de PM2.5 para la Estación “Museo de Antioquia”. Se observa que hay una tendencia estacional en el comportamiento de los datos, con picos muy notorios en los meses de marzo, y unos picos más sutiles alrededor de los meses de agosto y septiembre. No obstante, hay una gran dispersión en los datos mensuales, caracterizados además por la presencia de muchos outliers. De manera general, las concentraciones medias diarias de PM2.5 son cercanas a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, excepto los picos ya registrados, que incluso llegan a alcanzar los $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en marzo de 2016.

Esa misma figura se construyó para la Estación “Universidad Nacional - Núcleo El Volador”, en un punto sobre la ladera occidental del valle (Figura 28). Es claro que las concentraciones de PM2.5 registradas por esta estación son más bajas que las registradas por la estación localizada en el centro, lo cual es de esperarse. En este caso también se observa la tendencia estacional en el comportamiento mensual de los datos, exactamente con los mismos picos, unos muy notorios hacia los meses de marzo, y otros más sutiles alrededor de los meses de agosto y septiembre. Se observa una menor dispersión de los datos, aunque también hay una gran presencia de outliers. De manera general, es común que las concentraciones medias diarias de PM2.5 sean del orden de $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, excepto los picos del mes de marzo, que alcanzan valores máximos de $117 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estas temporadas de mayores concentraciones de PM2.5 en marzo de ambos años, se encuentran relacionadas con la ocurrencia de altas condiciones de estabilidad en el valle, gracias a las condiciones atmosféricas mencionadas y analizadas en las secciones anteriores, y estuvieron asociadas con las contingencias ambientales reportadas por los sistemas de monitoreo y alerta como el SIATA (Cuervo, 2017; AMVA-UPB, 2017). Ambas figuras también permiten observar que no se evidencian tendencias crecientes en la variación en el tiempo de las concentraciones de PM2.5, si se comparan los registros del año 2015 con los del año 2016.

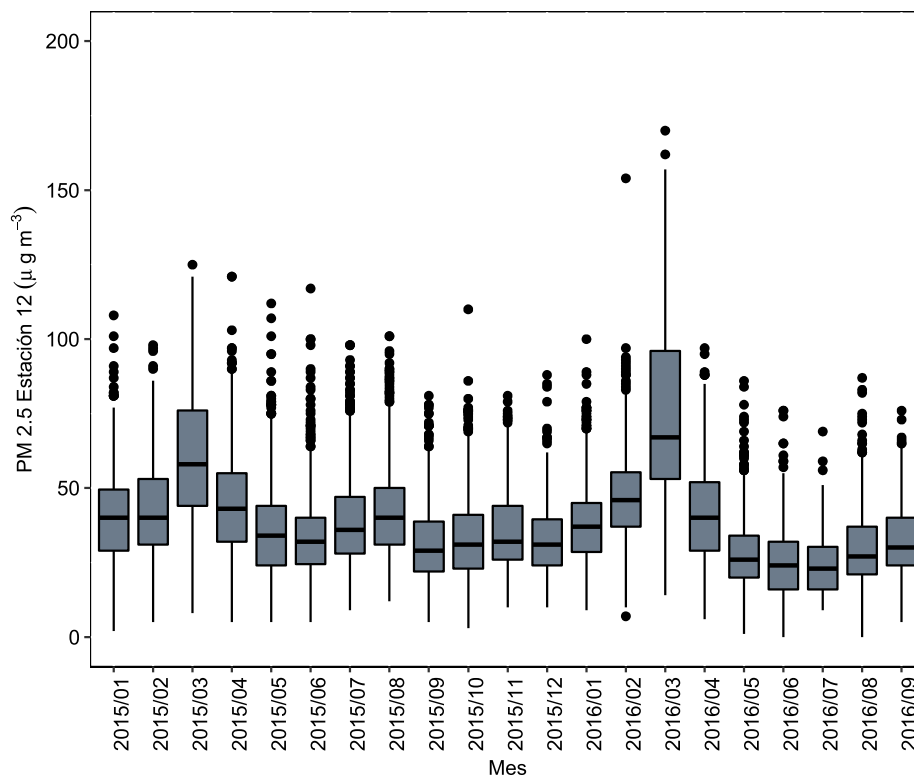


Figura 27: Distribución anual para las concentraciones de PM2.5 en la Estación 12 “Museo de Antioquia”.

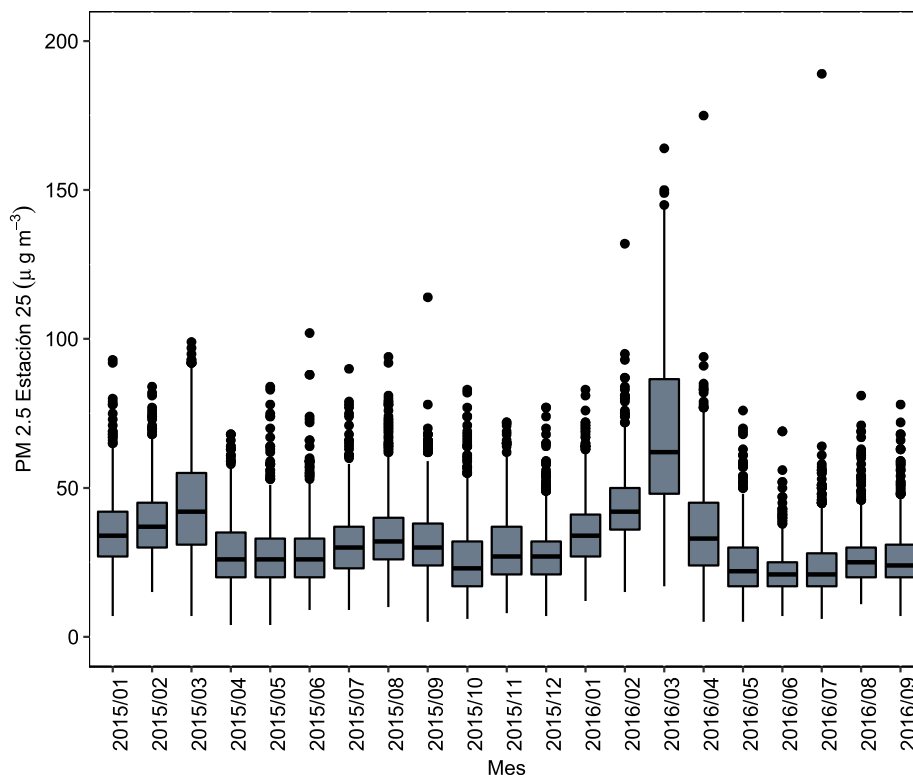


Figura 28: Distribución anual para las concentraciones de PM2.5 en la Estación 25 “Universidad Nacional Núcleo El Volador”.

Por otro lado, para analizar la distribución horaria de las concentraciones de PM2.5 en estas dos estaciones, se construyeron las Figuras 29 y 30, que representan estas distribuciones para la estación “Museo de Antioquia” y “Universidad Nacional - Núcleo El Volador”, respectivamente. De nuevo se observa que, en la estación ubicada en el centro de la ciudad, las concentraciones son mayores. Además, que hay un pico en estas concentraciones alrededor de las 8:00 am, con valores que superan los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el resto de las horas, se tienen unas concentraciones menos variables, alrededor de los $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un incremento claro hacia las 6:00 pm, aunque hay una gran dispersión en los datos horarios. Esto puede deberse a un efecto combinado entre las siguientes dos situaciones: la atmósfera apenas está empezando a mezclarse por efecto de la radiación, y las actividades de origen antrópico en el valle ya se encuentran en pleno desarrollo.

Otro análisis importante, es contrastar la concentración diaria de PM2.5 bajo la ocurrencia de eventos de inversión térmica, con aquella para los períodos de no inversión (Figuras 31 y 32, y 33 y 34, respectivamente). En general, puede decirse que no hay grandes diferencias: si se comparan estas dos condiciones para la Estación 12 “Museo de Antioquia” (Figuras 31 y 32) se observa la misma tendencia estacional en las concentraciones de PM2.5, con valores picos en el mes de Marzo y otros más sutiles alrededor del mes de Agosto; esta misma comparación para la Estación 25 “Universidad Nacional - Núcleo El Volador” (Figuras 33 y 34) muestra una mayor variación en la tendencia de las concentraciones de PM2.5 para las dos condiciones, con un valor pico en el mes de marzo de 2016. En ambas hay gran dispersión de los datos, con valores medios entre $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración. Es claro además que los valores registrados en la Estación 25 son menores que los de la Estación 12, como ya se expuso.

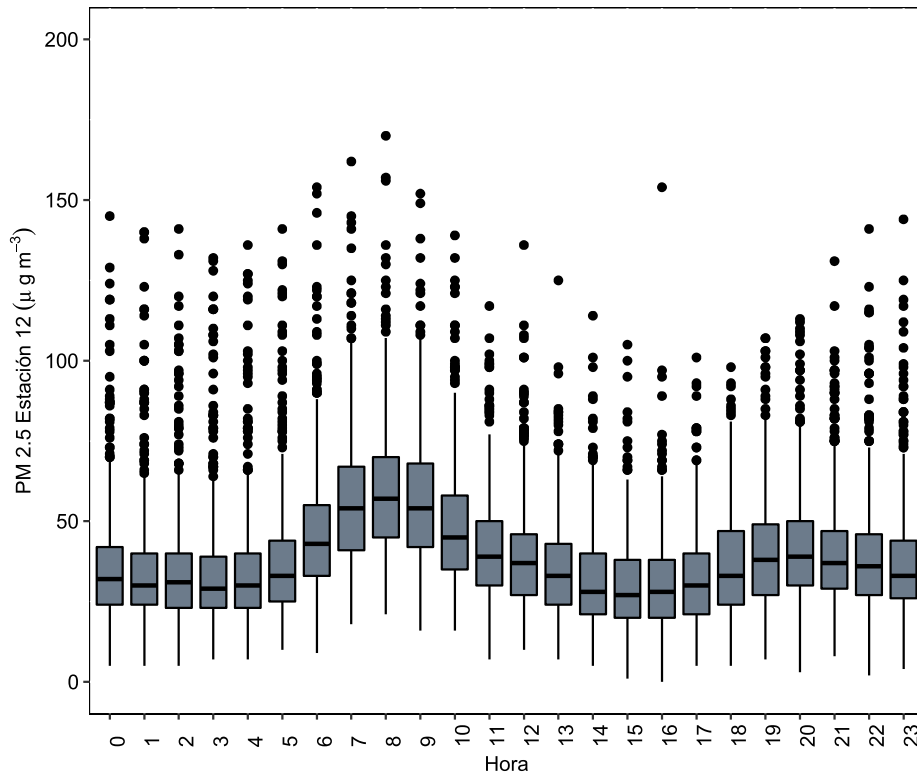


Figura 29: Distribución horaria para las concentraciones de PM_{2.5} en la Estación 12 “Museo de Antioquia”.

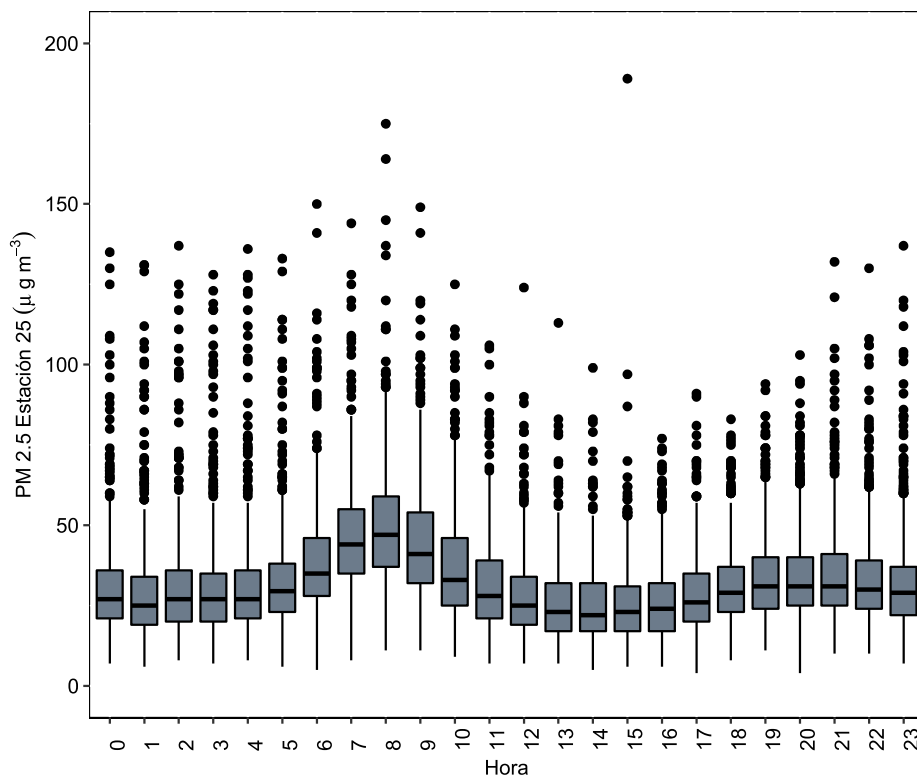


Figura 30: Distribución horaria para las concentraciones de PM_{2.5} en la Estación 25 “Universidad Nacional Núcleo El Volador”.

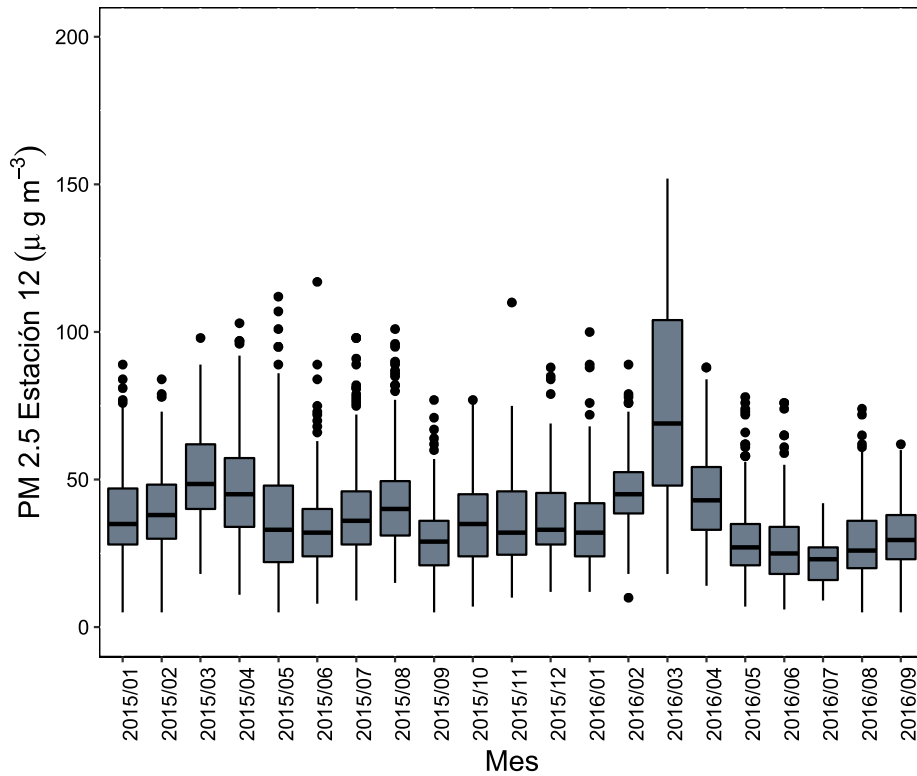


Figura 31: Distribución anual para las concentraciones de PM2.5 en la Estación 12 “Museo de Antioquia” – Días de inversión.

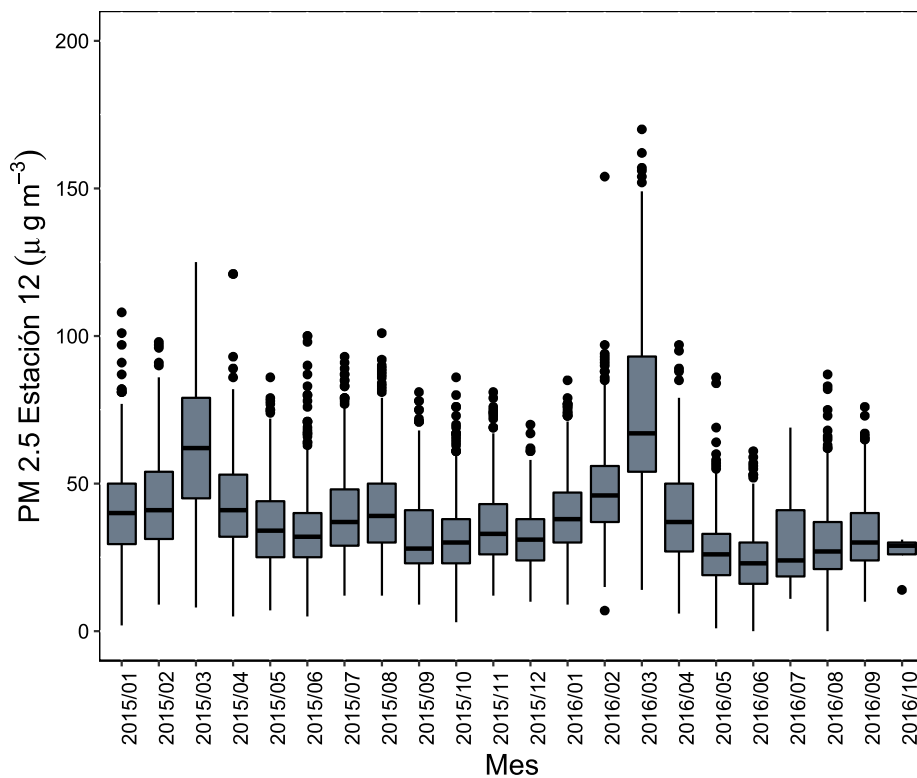


Figura 32: Distribución anual para las concentraciones de PM2.5 en la Estación 12 “Museo de Antioquia” - Días de NO inversión.

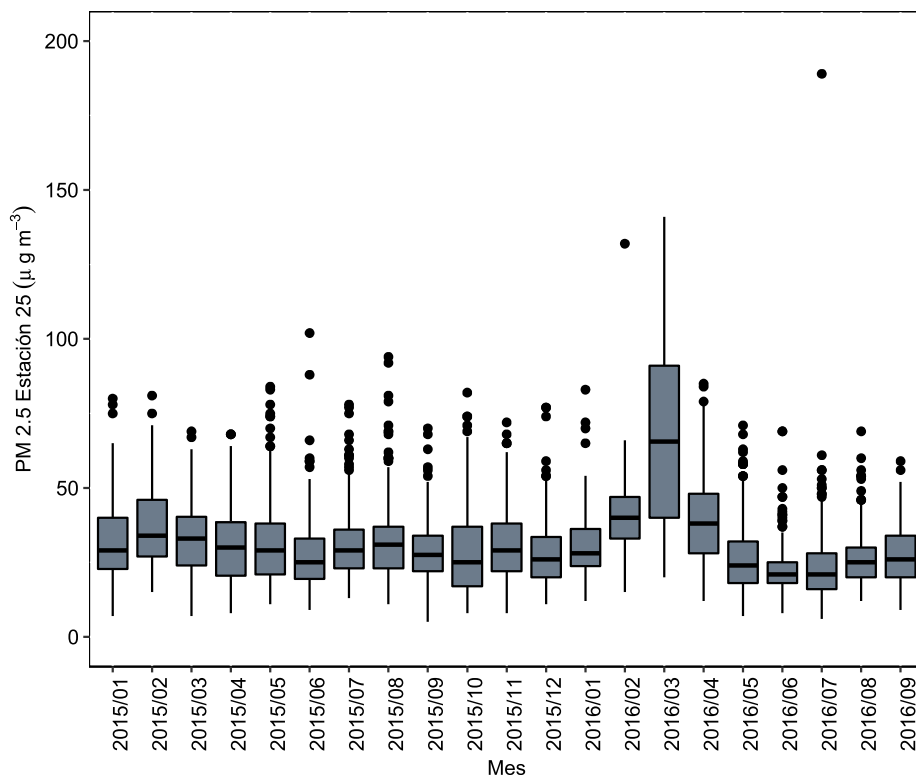


Figura 33: Distribución anual para las concentraciones de PM2.5 en la Estación 25 “Universidad Nacional - Núcleo El Volador” – Días de inversión.

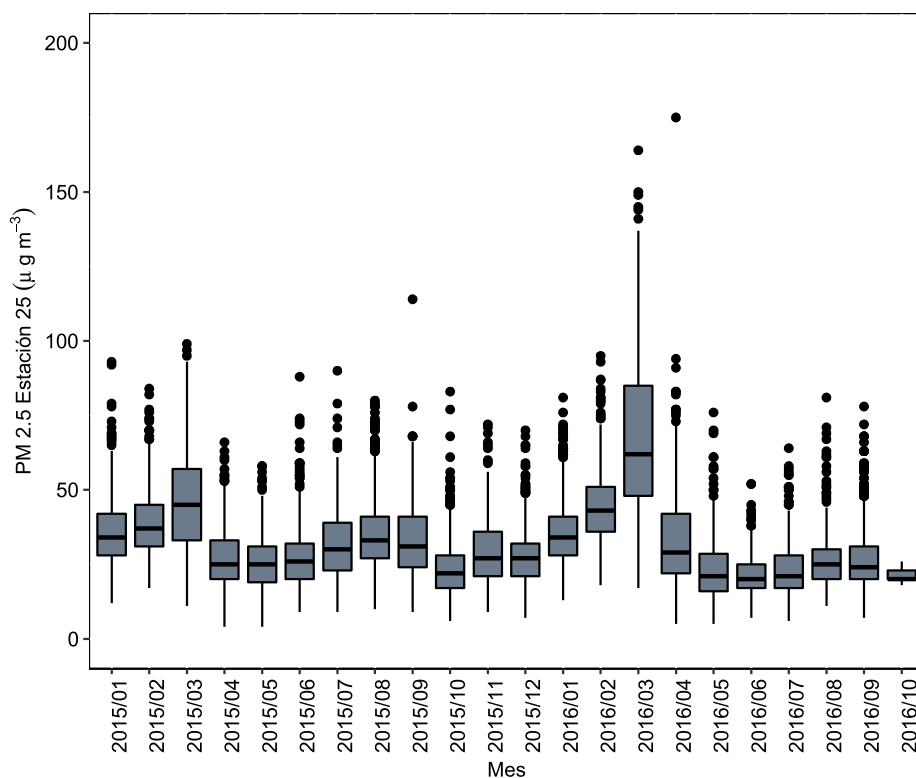


Figura 34: Distribución anual para las concentraciones de PM2.5 en la Estación 25 “Universidad Nacional - Núcleo El Volador” – Días de NO inversión.

Se verificó además el comportamiento de las concentraciones de PM2.5 en ambas estaciones, considerando las duraciones de cada uno de los eventos de inversión (aproximados a horas) para los que se disponían de datos de concentración. En ese sentido, para la estación “Museo de Antioquia” se construyeron las Figuras 35 y 36, que corresponden a la distribución de las concentraciones medias y máximas para cada duración, respectivamente. Cuando se observa el comportamiento de las concentraciones medias, se observa una gran dispersión y asimetría en los datos, incluso con existencia de varios outliers. Las máximas concentraciones en este caso, se relacionan con las duraciones de 1 y 2 horas. Cuando se mira el comportamiento de las concentraciones máximas, hay una tendencia diferente, en la que los mayores valores de PM2.5 se asocian con las máximas duraciones (5, 6, 7 y 8 horas de persistencia de las capas de inversión). Es de anotar sin embargo que también se observa una gran dispersión y asimetría en la distribución de los datos, con presencia de outliers.

En ambos casos las duraciones de 9, 10 y 20 horas de las capas de inversión no son representativas en el comportamiento general de la distribución, siendo casos excepcionales y aislados. Al respecto, vale la pena mencionar que en el evento de inversión que duró cerca de 20 horas, la concentración de PM2.5 estuvo muy por encima de $50 \mu g/m^3$, aunque el valor en la concentración para ese evento no fue el promedio máximo registrado entre todos los eventos analizados.

Del mismo modo, para la estación “Universidad Nacional - Núcleo El Volador” se construyeron las Figuras 37 y 38, que corresponden a la distribución de las concentraciones medias y máximas para cada duración, respectivamente. Las concentraciones medias muestran un comportamiento en el que en general, se tiene una disminución en la concentración al aumentar la duración del evento de inversión, siendo entonces las duraciones de 1 y 2 horas las que tienen los máximos valores en dichas concentraciones, incluso con valores superiores a los $50 \mu g/m^3$. Hay una menor dispersión en los datos, si son comparados con los de la otra estación analizada. Las concentraciones máximas siguen una tendencia diferente, y están caracterizadas por ser más grandes para las mayores duraciones de los eventos de estabilidad (5, 6, 7 y 8 horas de persistencia de las capas de inversión).

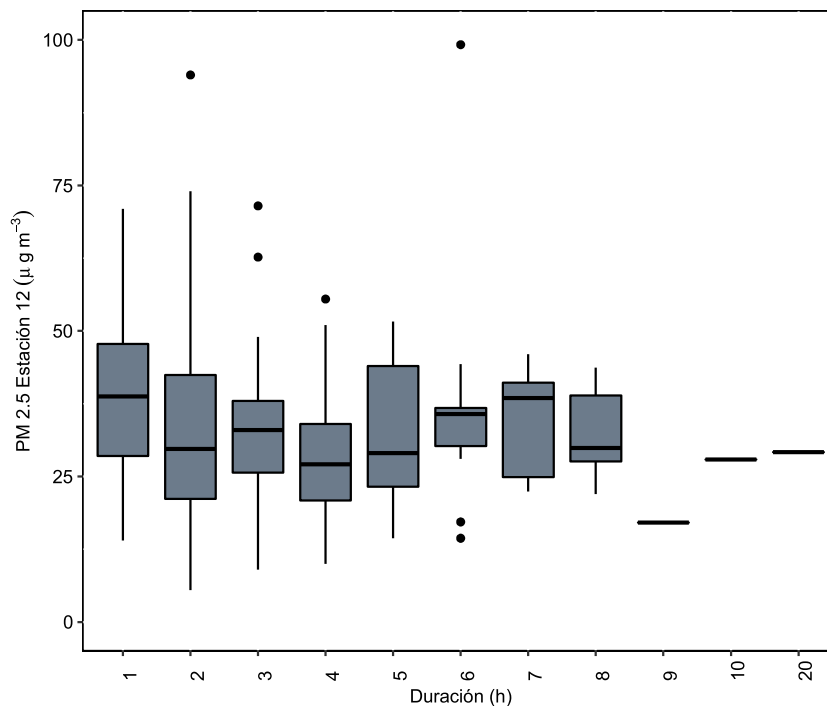


Figura 35: Distribución de las concentraciones medias de PM2.5 para diferentes duraciones de los eventos de inversión analizados. Datos de la Estación 12 “Museo de Antioquia”.

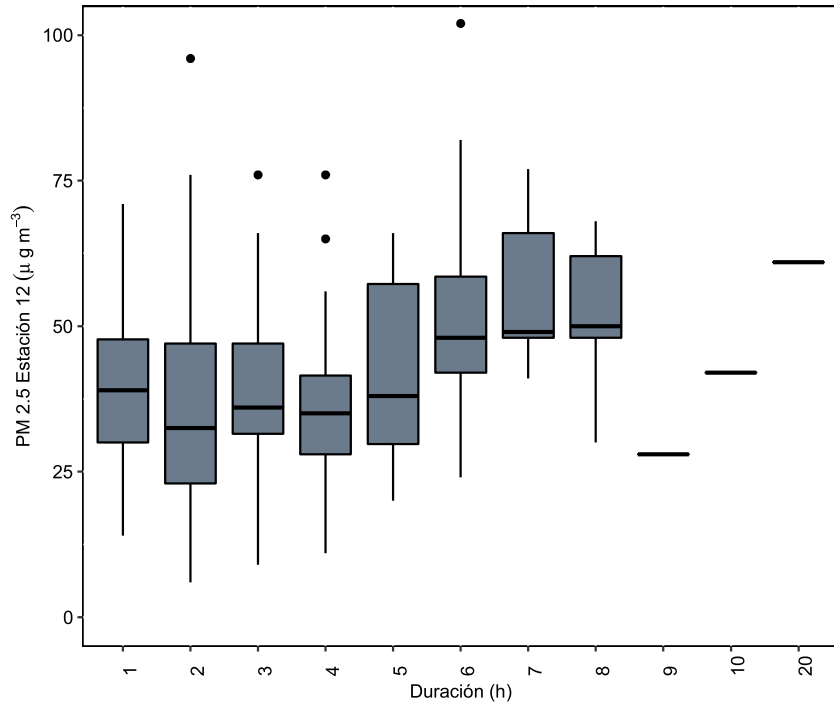


Figura 36: Distribución de las concentraciones máximas de PM2.5 para diferentes duraciones de los eventos de inversión analizados. Datos de la Estación 12 “Museo de Antioquia”.

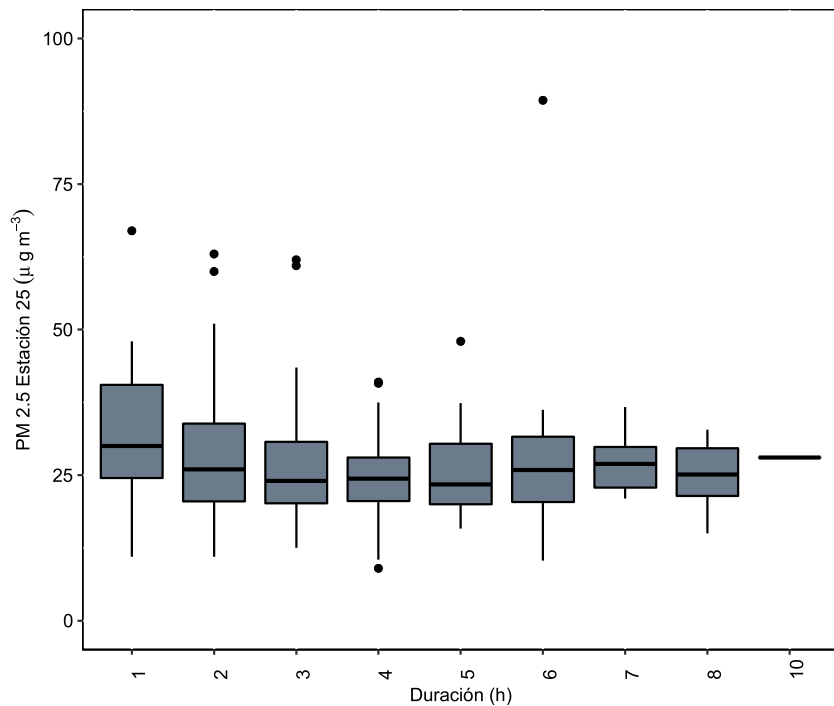


Figura 37: Distribución de las concentraciones medias de PM2.5 para diferentes duraciones de los eventos de inversión analizados. Datos de la Estación 25 “Universidad Nacional - Núcleo El Volador”.

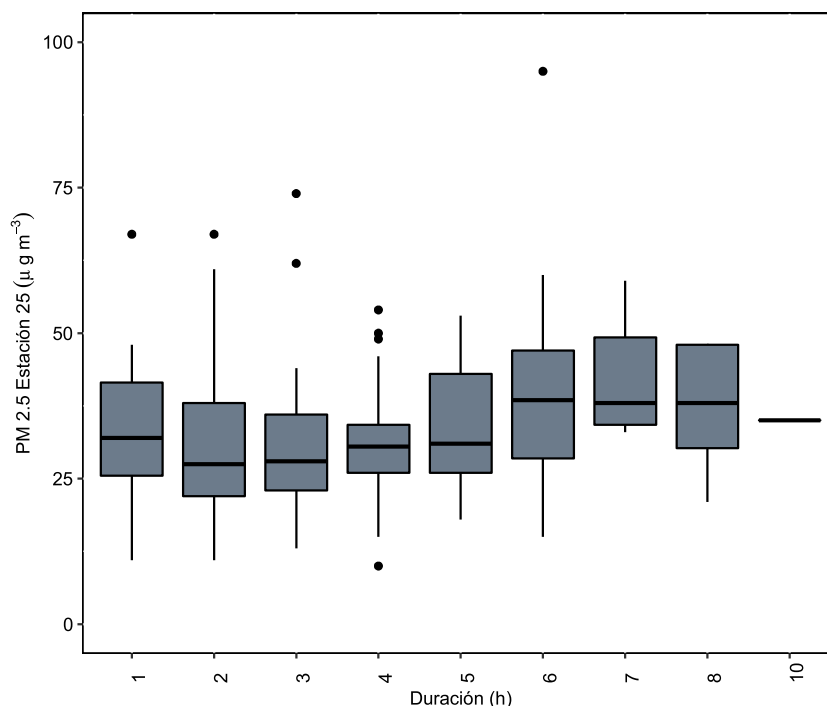


Figura 38: Distribución de las concentraciones máximas de PM2.5 para diferentes duraciones de los eventos de inversión analizados. Datos de la Estación 25 “Universidad Nacional - Núcleo El Volador”.

4. Discusión

La inversión térmica asociada con capas de alta estabilidad atmosférica es un fenómeno de ocurrencia significativa en el Valle de Aburrá, pues de los 621 días analizados, el 31 % tuvo eventos muy claros de inversiones superficiales con duraciones de por lo menos 1 hora, e incluso de varios eventos por día, para un total de 247 eventos bien caracterizados en ese periodo. Esta cifra puede ser entre un 10 % y un 20 % mayor, aduciendo a que en la presente investigación se omitieron del análisis aquellos eventos sugerentemente afectados por los efectos de la lluvia en el equipo de medición. Estos resultados son consistentes con las cifras presentadas por Uribe (2004), y con la presencia de la isla de calor al interior del valle, así como con que éste sea tropical, pues ambas condiciones favorecen el calentamiento de la superficie, que previene los eventos de inversión (Rendón *et al.*, 2014). En ese sentido, el fenómeno tiene una gran relevancia en el Valle, ya que sus dinámicas de formación y rompimiento pueden ejercer fuertes condicionamientos a la calidad del aire, esencialmente por ser un terreno complejo (Zapata *et al.*, 2015; Rendón *et al.*, 2015, 2014).

Se encontró que los meses en los que se desarrollan con más frecuencia estas capas de inversión son abril-mayo, julio y octubre; abril-mayo y octubre coinciden con la temporada de mayor nubosidad y precipitación en el valle, mientras que el mes de julio se encuentra en la temporada seca. Llama la atención además el incremento que hubo en la cantidad de eventos de inversión, comparando los resultados de las Figuras 18 y 19, para los años 2015 y 2016 respectivamente. Estas diferencias pueden estar relacionadas con la variabilidad climática que en ambos años se tuvo, como consecuencia del fenómeno de “El Niño” y su transición hacia un fenómeno de “La Niña”, (IDEAM, 2016). Esta transición puede llevar a condiciones diferentes de la atmósfera local y regional que favorecen la formación y desarrollo de estas capas de alta estabilidad cerca de la superficie.

Por otro lado, los efectos de las capas superficiales de alta estabilidad atmosférica sobre la calidad del aire, dependen muy sensiblemente de sus características tanto espaciales como

temporales. Entre esas características se encuentran la duración, definida como el periodo de tiempo comprendido entre los procesos de formación y rompimiento, hora de inicio de la capa, que es el momento inicial del proceso de formación, hora final de la capa, definido como el momento final del proceso de rompimiento, y el espesor, que es la diferencia de altitud, entre la base y el tope de la capa estable.

La estabilidad de la atmósfera tiene efectos sobre la calidad del aire porque, en general, una mayor persistencia de las capas estables conduce a una mayor acumulación de los contaminantes emitidos desde la superficie. Estudios previos han mostrado relaciones entre esta duración y la calidad del aire en ambientes urbanos. Por ejemplo, Kukkonen *et al.* (2005) presentan un interesante estudio en el que seleccionan 4 episodios de muy altas concentraciones de PM₁₀, para cuatro diferentes ciudades europeas: Oslo (del 4 al 10 de enero de 2003), Helsinki (del 3 al 14 de abril de 2002), Londres (del 18 al 27 de febrero de 2003) y Milán (del 14 al 19 de diciembre de 1998); encontrando que el transcurso de los episodios, en todos los casos, coincidió con la ocurrencia de eventos de inversión, de tal modo que en Oslo, Helsinki y Milán, prevalecieron fuertes inversiones térmicas superficiales o ligeramente elevadas, y en Londres, una ligera inversión superficial, aunque todas de larga duración (del orden de días). De manera más reciente, Largeron y Staquet (2016) estudiaron la relación entre las concentraciones de PM₁₀ y las dinámicas de inversiones térmicas persistentes durante el invierno en los valles Alpinos; estableciendo una fuerte correspondencia entre varios episodios de altas concentraciones de PM₁₀ y la presencia de inversiones persistentes, concluyendo además que, durante el invierno, los episodios de altos valores de PM₁₀ son exclusivamente inducidos por inversiones térmicas. De manera similar a estos estudios previos, los resultados obtenidos en este estudio permiten establecer una relación importante entre las condiciones de estabilidad y el comportamiento del material particulado PM_{2.5} en la baja atmósfera del Valle de Aburrá. Como caso particular se resalta el hecho de que las máximas concentraciones de material particulado PM_{2.5} estén asociadas con las máximas duraciones de los eventos de alta estabilidad atmosférica detectados.

De la Figura 16 se tiene que el 41% de las duraciones se encuentran entre 2 y 4 horas. Incluso la gran mayoría de los outliers (salvo 2 excepciones) no superan las 10 horas. La Figura 17 confirma que la mayoría de eventos tiene una duración entre 2 y 4 horas. Esto indica que el proceso conjunto de formación y rompimiento de capas superficiales de alta estabilidad (inversión de la temperatura real) está esencialmente contenido dentro del ciclo diurno, y su duración es relativamente corta en comparación con estudios que reportan la persistencia de capas de estabilidad por períodos de tiempo superiores a un día, e.g. Kukkonen *et al.* (2005) y Largeron y Staquet (2016).

En ninguno de los casos observados una misma capa se mantuvo por más de un día. Esto es consistente con la condición tropical del valle, según la cual la radiación incidente, que es el flujo de energía del que depende el rompimiento de las capas de inversión (la desestabilización de la atmósfera superficial), es alta durante todo el año. Además, la alta urbanización de la superficie en el valle favorece la producción de calor sensible (SH) sobre la de calor latente (LH), siendo el aumento de la relación de Bowen, $Bo=SH/LH$, un efecto conocido típico de la urbanización (Rendón *et al.*, 2014; Offerle *et al.*, 2006). Esto plantea un contraste entre el Valle de Aburrá y valles estudiados en investigaciones previas, en donde la persistencia de capas de inversión durante periodos de tiempo que se extienden más allá de 24 horas, pudiendo incluso abarcar varios días, han sido asociados con graves eventos de contaminación (Chen *et al.*, 2012; Kukkonen *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2015). Es claro además que las características y las variaciones en el espesor las capas de inversión estudiadas, no tienen un patrón estacional, y más bien, son características sujetas al ciclo diurno. Estas capas tienen un espesor medio de 120 m, mientras que el máximo se encuentra alrededor de los 200 m, caracterizándose entonces por ser inversiones térmicas superficiales. Es importante tener en cuenta que este estudio se concentró en la ocurrencia y caracterización de capas de alta estabilidad asociadas con inversión térmicas y que de acuerdo con los criterios utilizados, es posible que capas de estabilidad con gradientes

menores hayan quedado por fuera de los análisis aquí realizados. Involucrar esas capas estables pero con gradientes menores podría conducir a encontrar capas de estabilidad de duración mayor a las aquí reportadas. La decisión de analizar condiciones de estabilidad con gradientes fuertes obedeció, como se explicó en la metodología, al interés de analizar casos extremos de estabilidad atmosférica y sus implicaciones sobre la calidad del aire en el Valle.

Con respecto al proceso de formación de las capas de inversión, y con referencia a la Figura 20, el 72 % de las capas de alta estabilidad se comienzan a formar entre las 9:00 pm y las 5:00 am. Este periodo coincide con la predicción teórica de que la formación de capas de inversión es un fenómeno típicamente nocturno, relacionado con la ausencia de radiación solar directa que, dependiendo de las características de la superficie (e.g. calor específico), puede dar lugar al enfriamiento de la superficie con relación a capas bajas de la atmósfera, con lo que se originan las capas de inversión o alta estabilidad (Allen, 2015; Janhäll *et al.*, 2006; Clements *et al.*, 2003; Anquetin *et al.*, 1998).

En lo que tiene que ver con el proceso de rompimiento, las Figuras 22 y Figura 23 permiten concluir que en el Valle de Aburrá, es común que las capas de alta estabilidad se rompan en el rango comprendido entre las 3:00 am y las 9:00 am, y de manera más específica, entre las 5:00 am y las 7:00 am, que coincide con el amanecer y con el calentamiento progresivo de la superficie. Además, se evaluó la variabilidad temporal del rompimiento, a partir de los patrones propuestos por Whiteman (1982); estos patrones son: (i) el crecimiento de la CBL, (ii) el descenso del tope de la inversión y (iii) la combinación de los dos anteriores. No obstante, estos patrones fueron definidos a partir de las observaciones hechas en valles de las Montañas Rocosas (Colorado, Estados Unidos), que por ejemplo, se encuentran ubicados en medias latitudes por fuera del trópico y típicamente exhiben bajas humedades. Una de las preguntas claves que han guiado la presente investigación es si esos mismos patrones describen bien el proceso de rompimiento en un valle con diferencias sustanciales como las que exhibe el Valle de Aburrá: un valle tropical, con condiciones de alta humedad y densamente urbanizado. Incluso, estrecho, al ser geomorfológicamente más parecido a un cañón que a un valle (Whiteman. D., comunicación personal; Hoyos C.D., comunicación personal; Mesa (2017); López (2016)).

Es importante mencionar que un porcentaje cercano al 46 % de los eventos caracterizados tuvo un rompimiento antes del amanecer (entre las 9:00 pm y las 5:00 am). Este rompimiento en la madrugada puede estar relacionado con el debilitamiento del efecto que produce la presencia de la ciudad (isla de calor urbana) (Bornstein, 1968), ya que con este debilitamiento, que se presenta en la madrugada por el cese de la mayoría de las actividades antrópicas propias de la ciudad, favorecido además por el hecho de que en el valle de Aburrá no suelen usarse sistemas de calefacción masivos, se posibilita que la atmósfera local adopte una tendencia hacia las condiciones típicas.

También con respecto al rompimiento de las capas de inversión, se encontró que en el Valle de Aburrá los procesos que lo dominan son el descenso del tope, y el efecto combinado del descenso del tope y el crecimiento de la CBL (Figuras 24 y Figura 25). Este resultado puede ser analizado a partir de dos contrastes: Por un lado, coincide con las observaciones de Rendón (2007), en donde se simula el proceso de rompimiento en el Valle de Aburrá y se concluye que el proceso que más influye es el descenso del tope de la inversión. Whiteman (1990), que, a través de una investigación de los ciclos diurnos de formación y rompimiento de las capas de inversión en valles y cuencas, propone que el patrón de rompimiento por crecimiento de la CBL sea común en valles amplios, en los que los flujos ascendentes transportan pequeñas cantidades de volumen, con respecto al volumen atmosférico total de la sección transversal, y como el valle estudiado es muy estrecho, sería de esperar que fuera poco frecuente; en ese mismo texto, Whiteman (1990) además propone que el patrón (iii) es el más común en la destrucción de las capas de inversión en valles, coincidiendo con lo que se encontró en este estudio. Por el contrario, en Rendón *et al.* (2014) se propone que el patrón de rompimiento es sensible al porcentaje de área urbana, y a través de simulaciones, se encuentra que, en ninguno de los casos considerados, hay rompimiento

por descenso del tope. No obstante, se propone que en los valles altamente urbanizados, como en el caso del Valle de Aburrá, es común que el rompimiento sea por el patrón (iii), que implica que el tope de la inversión descienda mientras la CBL asciende. Además, entre la parte superior de las laderas y el fondo del valle de Aburrá hay una marcada diferencia en los usos del suelo, pues mientras en el fondo está emplazada la ciudad, las laderas, con la altura, se tornan más rurales; el gradiente que se genera entre estas dos condiciones tiende a generar subsidencia de aire por las laderas, favorecido además por la topografía de valle estrecho, con lo que se puede dar lugar al descenso del tope de las capas de inversión. Caracterizar el tipo de rompimiento de las capas de inversión en un valle es relevante porque, por ejemplo, la manera como se dé el rompimiento condiciona el transporte y la formación de trampas de contaminantes cerca de la superficie, lo que puede dar lugar a episodios fuertes de contaminación sectorizados.

Eventos de inversión con la misma duración pueden tener efectos muy distintos, dependiendo de la hora de inicio y final de la capa, es decir, dependiendo de las horas del día durante las cuales se presentan los procesos de formación y rompimiento de estas capas de alta estabilidad superficial. Esto está estrechamente relacionado con la alta variabilidad temporal de las emisiones de contaminantes atmosféricos (Largeron y Staquet, 2016; Li *et al.*, 2014; Janhäll *et al.*, 2006; Mayer, 1999), de ahí que sea importante estudiar la relación entre los procesos de inversión térmica y la concentración de los contaminantes atmosféricos, y de manera consecuente, su relación con la calidad del aire del Valle de Aburrá en particular, y de otros valles urbanizados en general. Al respecto, la presencia de capas de alta estabilidad es más crítica cuando coincide con la presencia de altas emisiones. En el Valle de Aburrá, el ciclo diurno de las emisiones está parcialmente controlado por la medida de gestión de la calidad del aire conocida como “pico y placa”. Esta medida es aplicada desde el 2005 en la ciudad, y consiste en restringir la circulación de automóviles de servicio particular y motos de dos tiempos, en el horario comprendido entre las 7:00 am y las 8:30 am y de las 5:30 pm hasta las 7:00 pm, así como de los taxis, desde las 6:00 am y hasta las 7:00 pm, de acuerdo con el dígito final de la placa (Posada *et al.*, 2011). Si se observan las Figuras 29 y Figura 30, es claro que en el valle se tiene un patrón de concentración de los contaminantes, en este caso PM_{2.5}, estrechamente ligado a esta medida, pues hay dos picos, uno en las primeras horas de la mañana, alrededor de las 8:00 am, y otro al caer la noche, hacia las 6:00 pm, rangos en los que la dispersión de contaminantes es más débil (Jiménez *et al.*, 2011).

Cuando se comparan las concentraciones de PM_{2.5} para los días con capas de alta estabilidad y los días sin ellas, no hay diferencias marcadas entre ambas situaciones, ni se encuentra una relación directa entre los eventos de alta estabilidad y picos abruptos en la concentración de PM_{2.5}. Una posible explicación podría obedecer a la no inclusión de capas medianamente estables y de larga duración en los análisis. Esta situación se propone a la luz de los resultados encontrados.

Cuando se compara el comportamiento de la humedad relativa con la presencia de capas de inversión, se tiene que durante la evolución de las capas hay un notorio incremento en los valores de humedad relativa superficiales, de acuerdo con lo observado en las Tablas 2 y 3. En el caso particular del Valle de Aburrá, los resultados encontrados sugieren que no es el incremento en la humedad relativa el que contribuye a la formación de las capas de alta estabilidad, sino que la presencia de estas capas restringe el transporte vertical en la atmósfera local y favorece la formación de “trampas de humedad” al interior del Valle y por debajo de las capas de inversión (Belorid *et al.*, 2011). Esto se puede concluir porque las observaciones muestran que en las horas de máxima radiación para un día con inversión térmica, la humedad es mayor en las horas de inversión que en las horas donde se esperaría una mayor humedad con el aumento de la radiación, producto de la liberación de calor latente asociada con procesos evaporativos que tienen lugar hacia y después del medio día (Yasmeen, 2011).

Diferencias en el comportamiento de las variables analizadas entre los años 2015 y 2016 pueden deberse a efectos de gran escala como el ENSO. Sin embargo estos análisis no se

involucraron en el trabajo por escapar a los objetivos de la investigación, y por no contar con la información pertinente para realizar un análisis juicioso de estos efectos.

5. Conclusiones

El Valle de Aburrá es un valle de topografía compleja, densamente poblado y localizado en el trópico, lo que hace que se encuentre sometido a altas condiciones de humedad durante todo el año. Estas características particulares favorecen la ocurrencia de capas de estabilidad atmosférica que condicionan la dispersión de contaminantes al interior del valle. Lo anterior sumado a las altas tasas de emisión de contaminantes desde la superficie, propias de las actividades de origen antrópico, tienen fuertes impactos sobre la calidad del aire y las condiciones medioambientales del Valle.

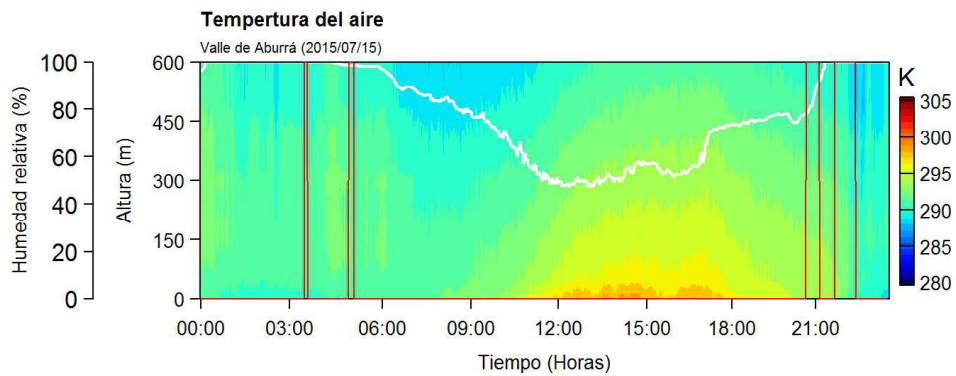
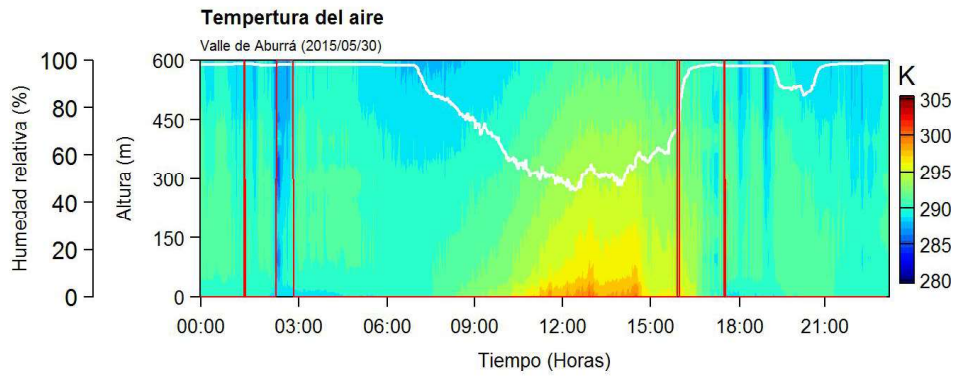
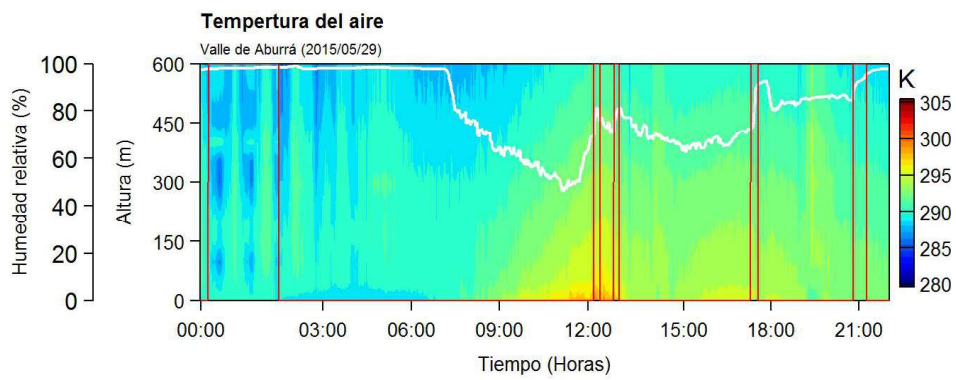
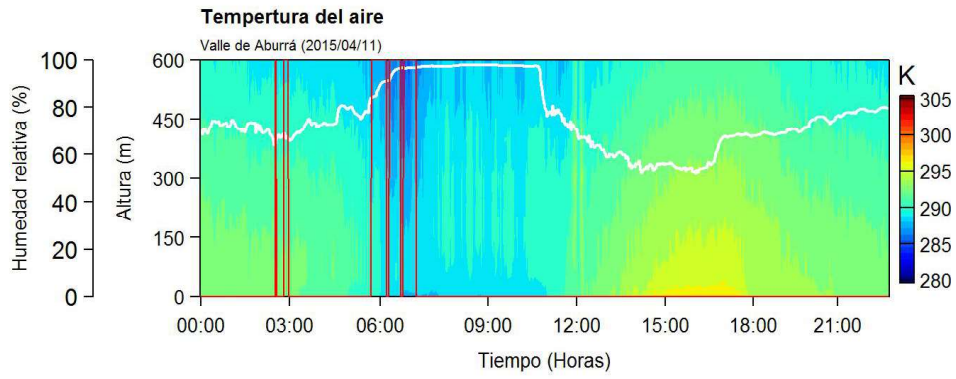
De manera puntual, la ocurrencia de capas de alta estabilidad, caracterizadas por un gradiente positivo de la temperatura real con la altura, es un fenómeno recurrente en el Valle, con una evolución que está contenida en el ciclo diurno, pues son capas que suelen formarse en la noche y en las primeras horas de la madrugada, y que desaparecen entrada la madrugada y después del amanecer. De este modo, el proceso de formación de estas capas de inversión está asociado a la ausencia de la radiación solar y al debilitamiento de la isla de calor al interior de la ciudad. En lo que tiene que ver con el proceso de rompimiento, éste se genera por el incremento gradual de la radiación (después del amanecer) y por el transporte de vientos de ladera (anabáticos), que a su vez producen subsidencia.

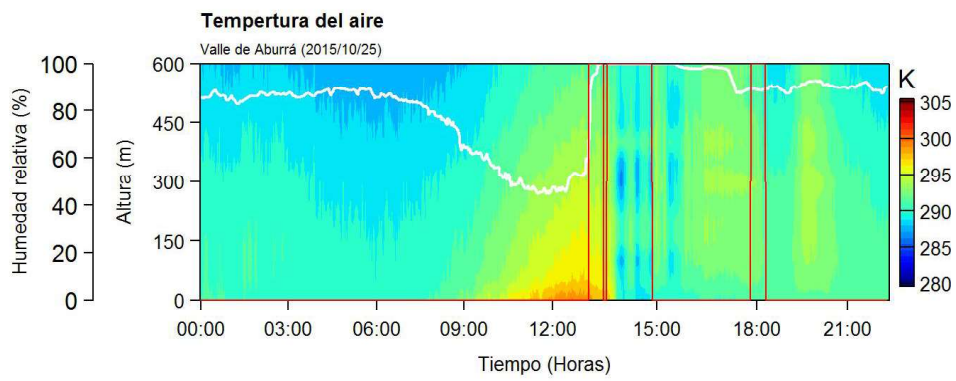
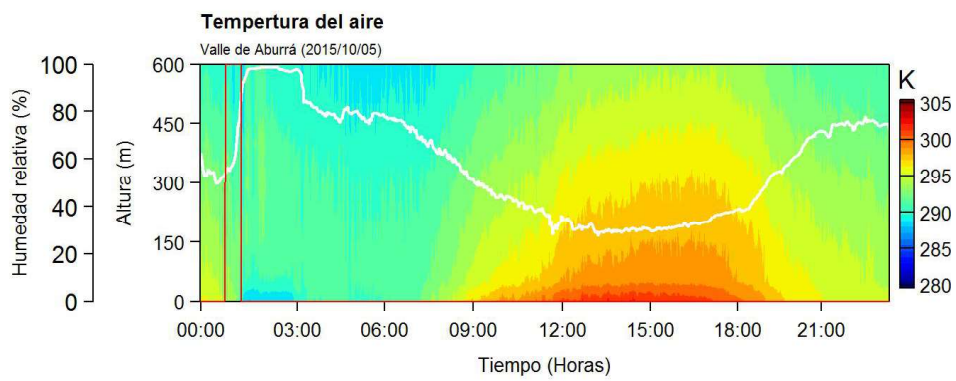
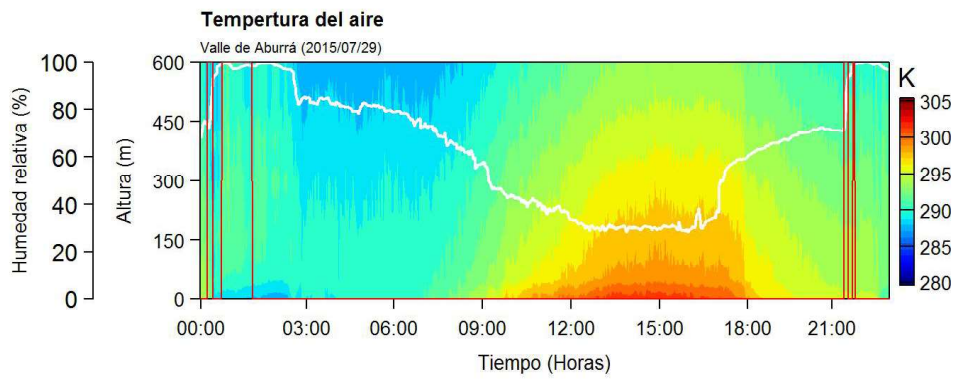
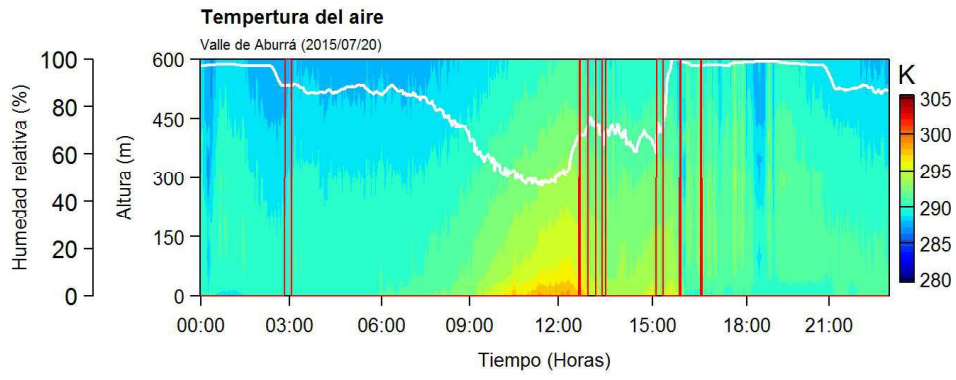
Estos patrones de rompimiento han sido bien estudiados en valles no urbanizados, en altas latitudes y relativamente secos, encontrándose que hay tres patrones típicos que pueden originarlo: el crecimiento de la capa límite convectiva por el calentamiento de la superficie (que implica el ascenso de la base de la capa de inversión), el descenso del tope de la capa, provocado por los vientos de ladera ascendentes, y una combinación entre los dos anteriores (que implica que el ascenso de la base y el descenso del tope se den simultáneamente). Si se contrastan estos patrones teóricos con las observaciones (mediciones directas) en el Valle de Aburrá, es claro que hay muchas similitudes, y que esos modelos teóricos no distan de la dinámica que se desarrolla en el Valle, alrededor del balance de energía, que depende de todas sus particularidades.

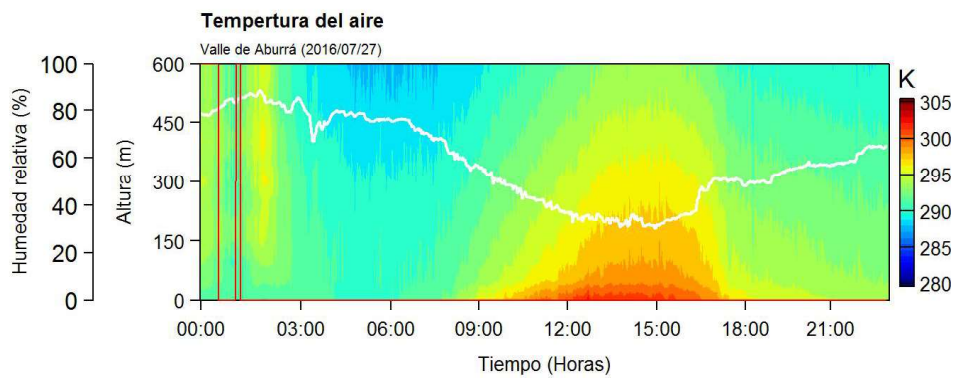
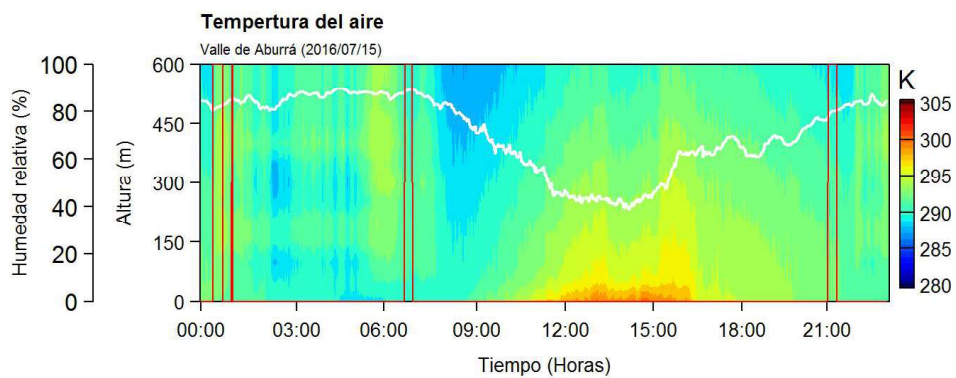
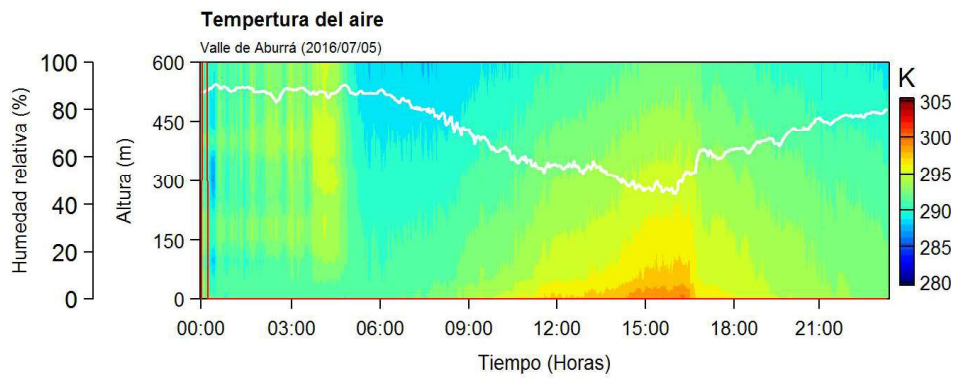
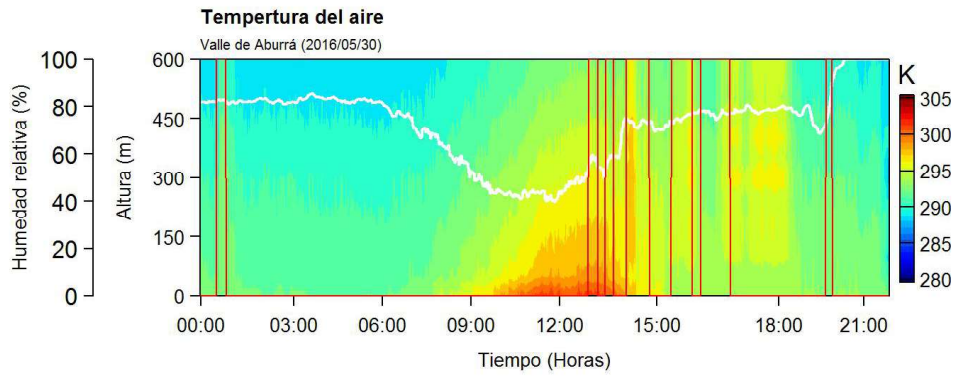
En el Valle de Aburrá las capas de estabilidad están muy relacionadas con la calidad del aire de la región por producir un efecto de taponamiento para la dispersión de contaminantes atmosféricos, influyendo en el incremento de su concentración, y de esta manera, en la calidad del aire. Este es un factor clave, de gran interés e importancia en la agenda ambiental y de salud pública de la ciudad, que involucra no solo la atención en las fuentes de emisión del material particulado (actividades industriales y de transporte), sino en las particularidades topográficas y meteorológicas del Valle, que también inciden en las dinámicas de estas capas, y de manera consecuente, en los procesos de dispersión de contaminantes fuera de él.

En ese sentido, y teniendo en cuenta las condiciones de complejidad del Valle de Aburrá (topográficas, de usos del suelo, de actividades industriales y de transporte, de su localización en el trópico y su alta urbanización), los estudios interdisciplinarios de la capa límite y de la interacción suelo-atmósfera, son cruciales en la gestión sostenible del territorio. Si bien se pudieron hacer observaciones muy interesantes de las dinámicas al interior del Valle, relacionadas con las capas de alta estabilidad y la concentración de contaminantes atmosféricos, se hace necesario ahondar en este tipo de estudios, de tal modo que se haga una aproximación y una lectura adecuada de lo que sucede en la naturaleza.

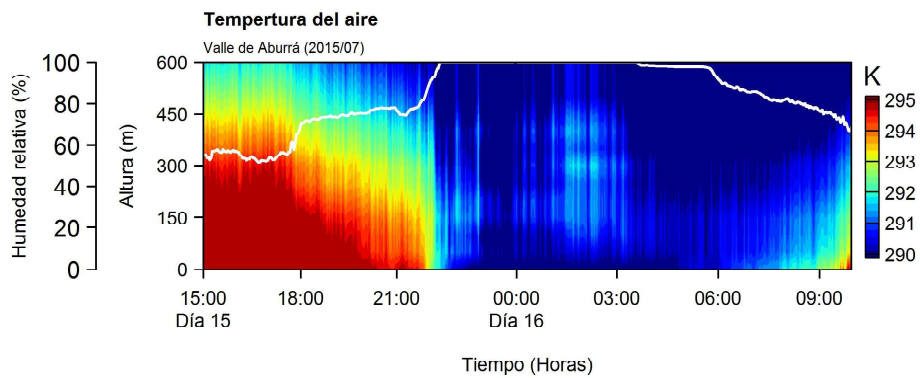
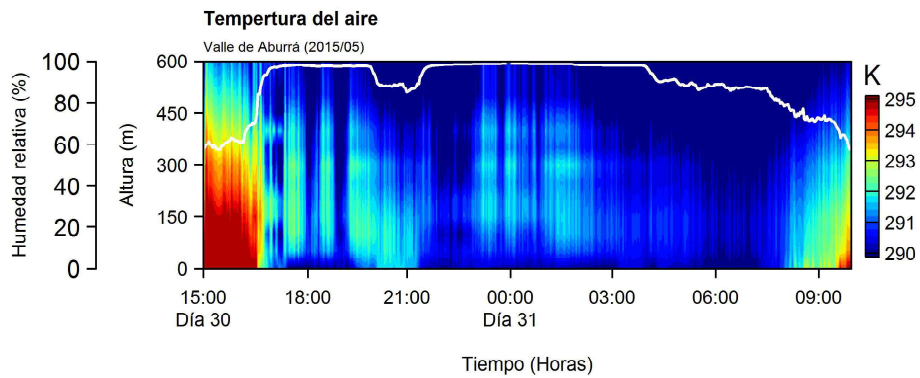
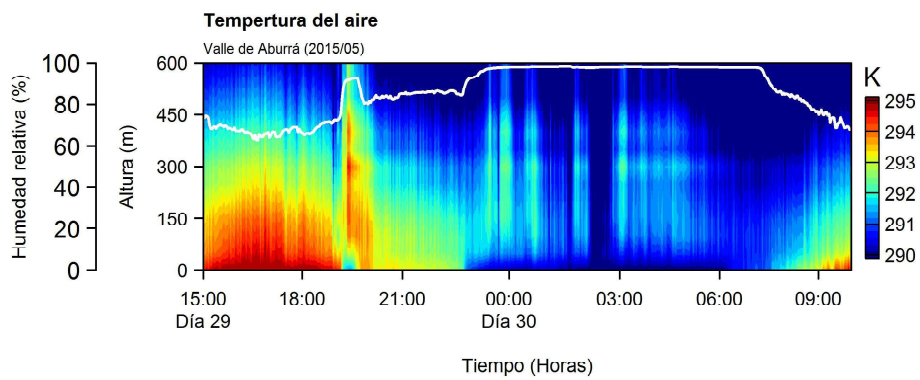
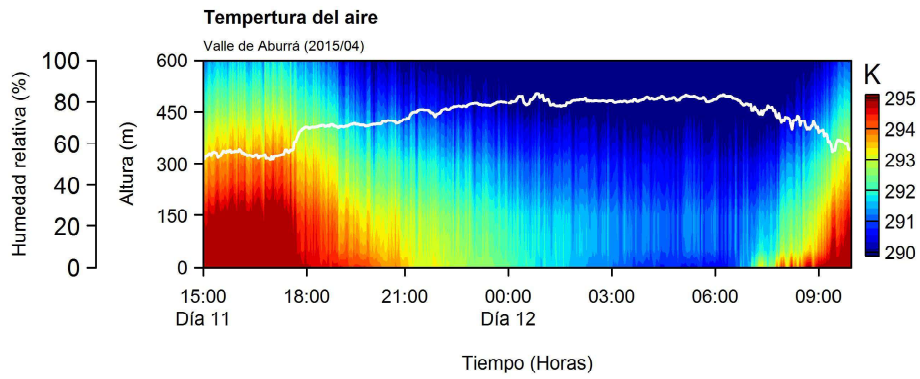
Anexo I: Contornos de temperatura real.

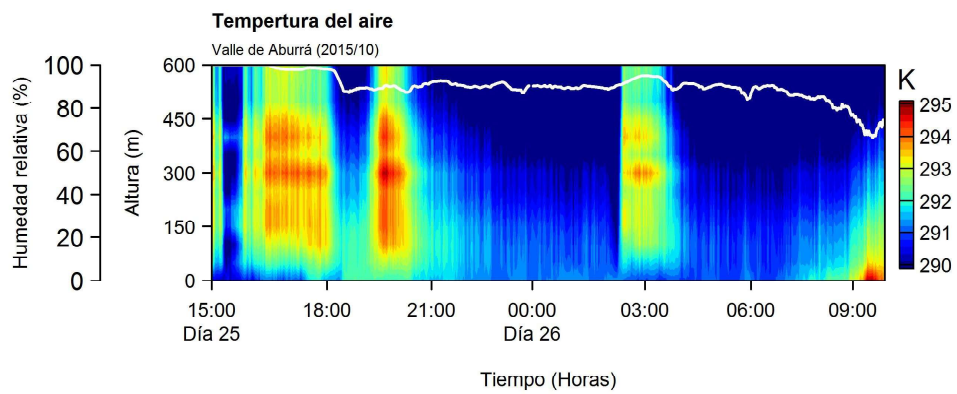
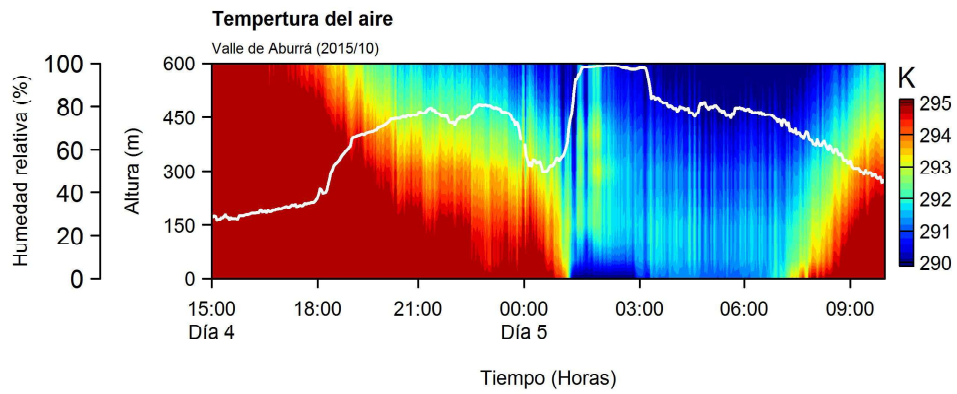
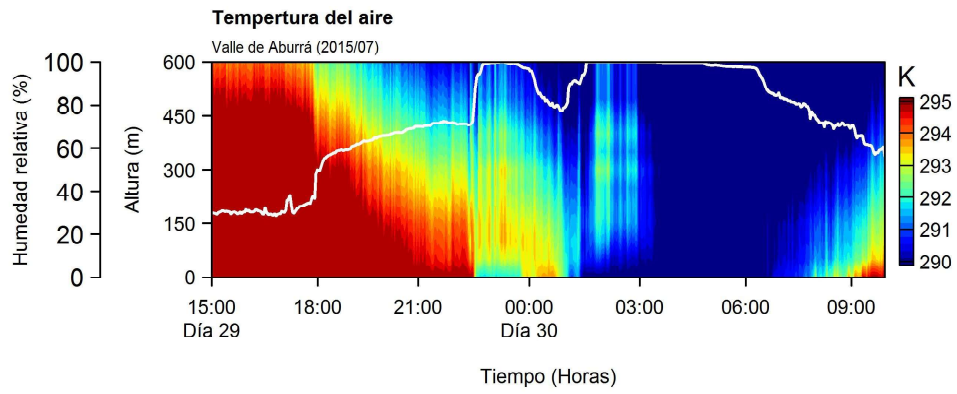
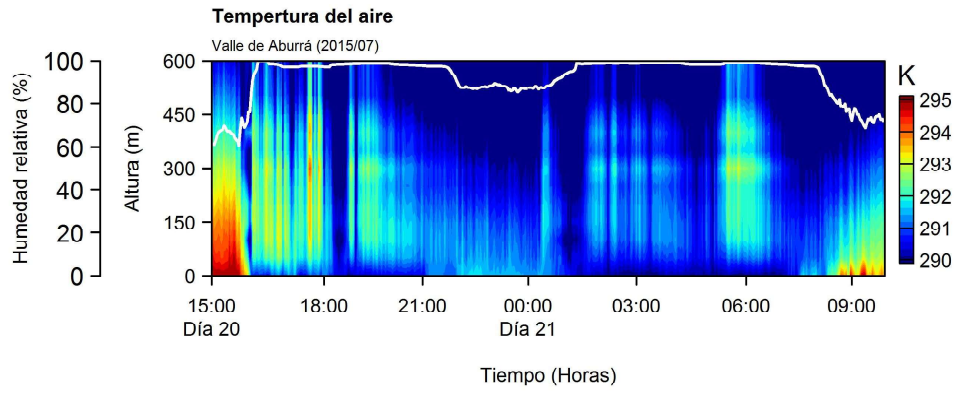


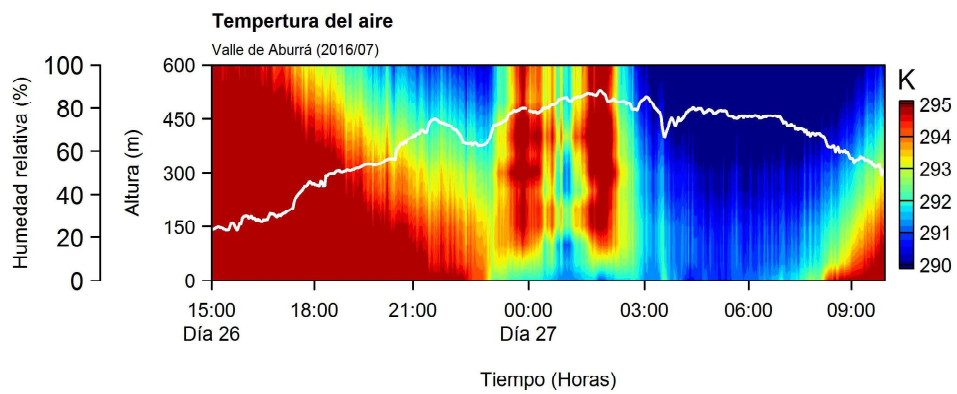
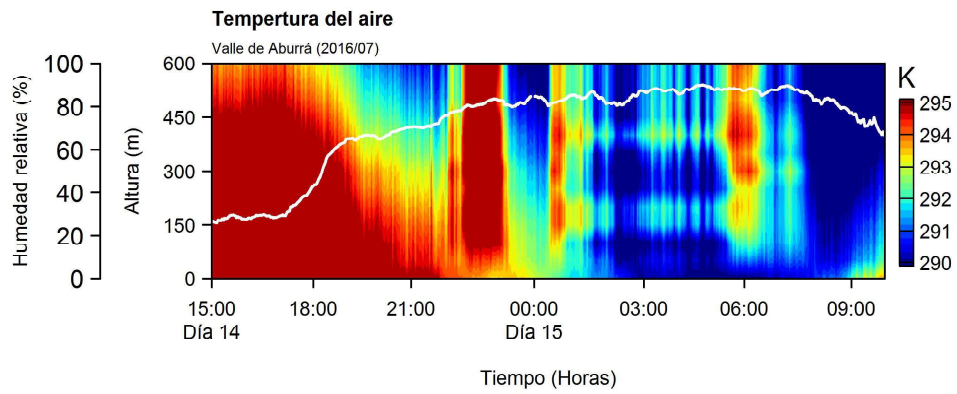
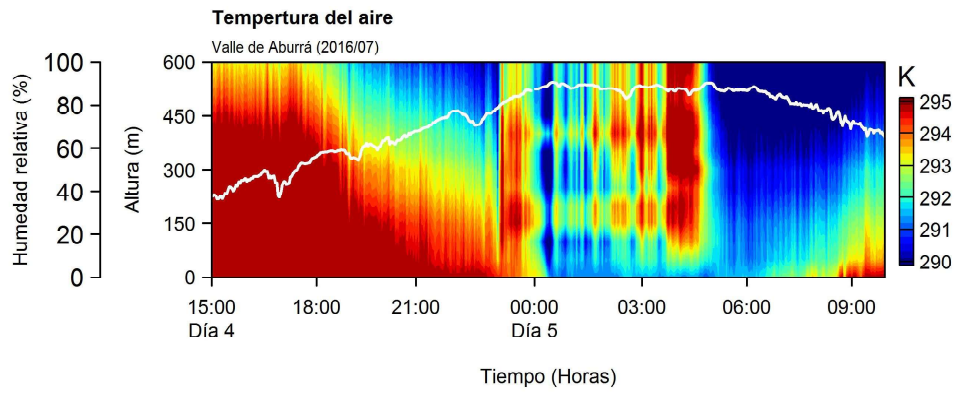
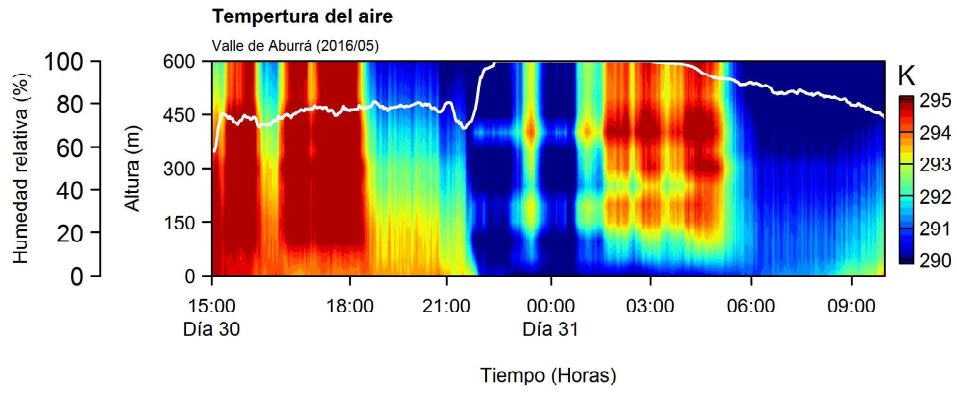




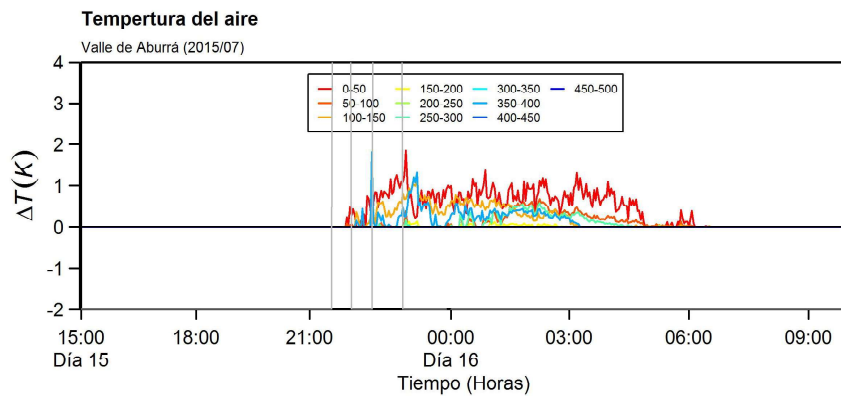
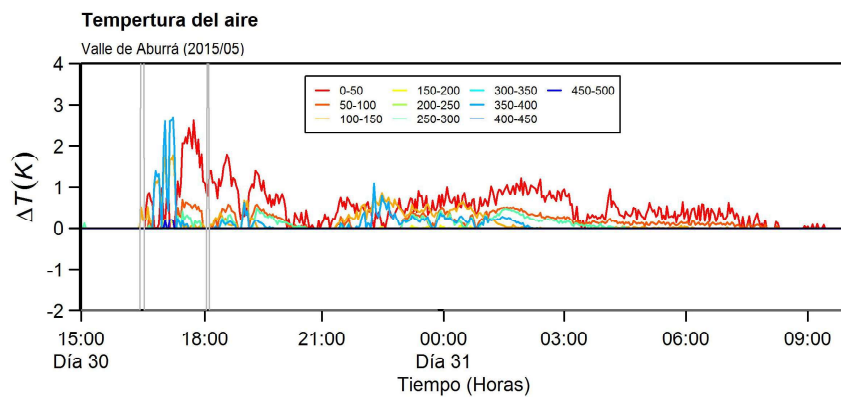
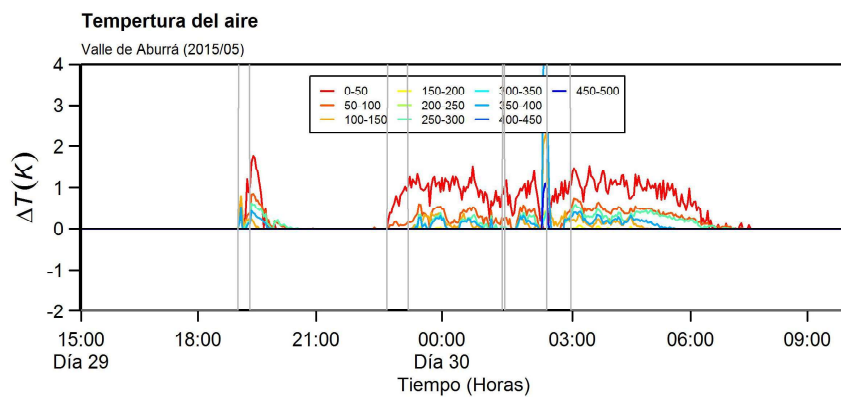
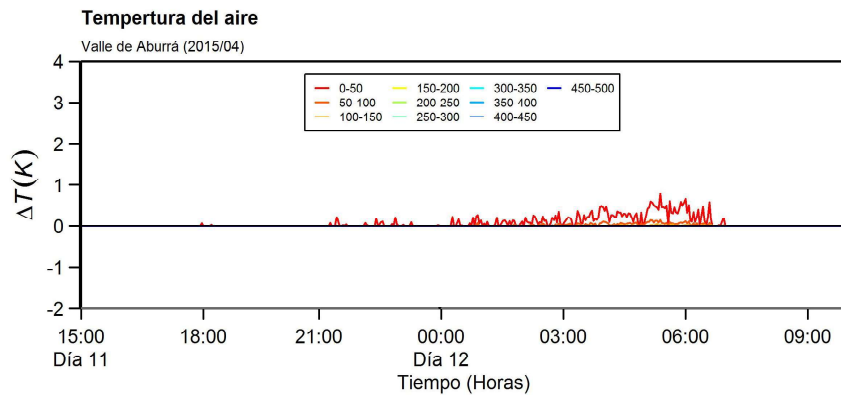
Anexo II: Contornos de temperatura real para detectar inversiones.

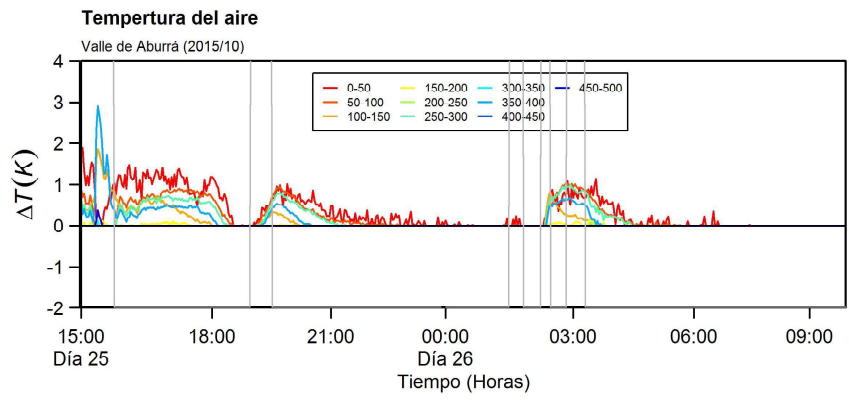
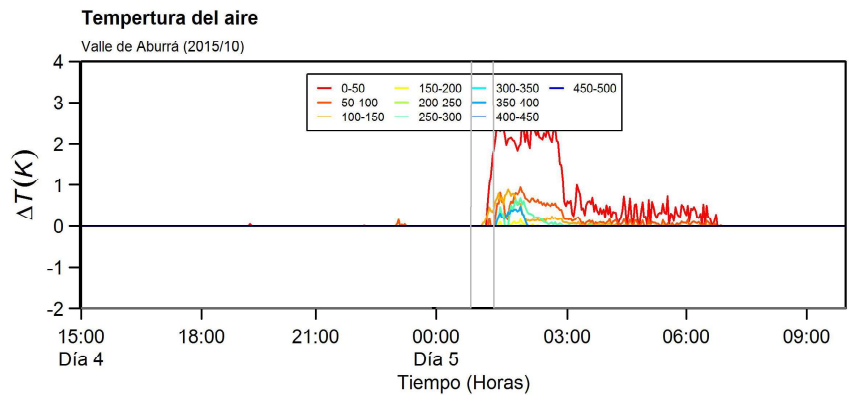
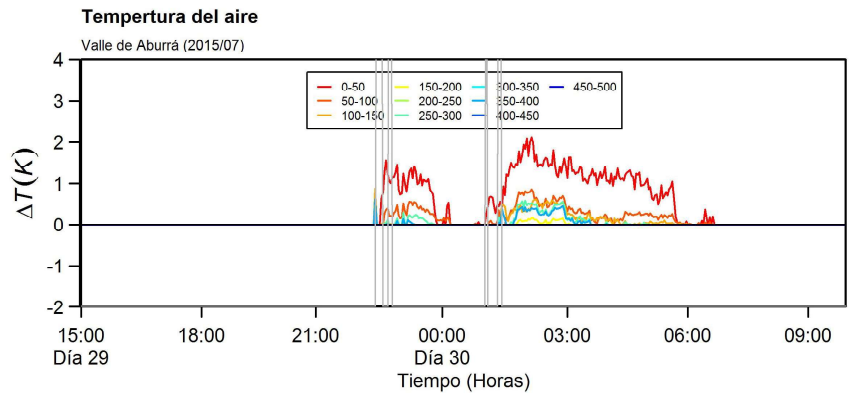
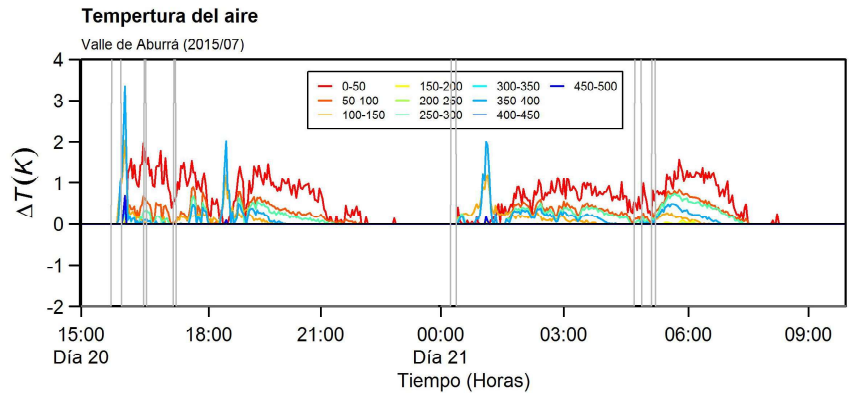


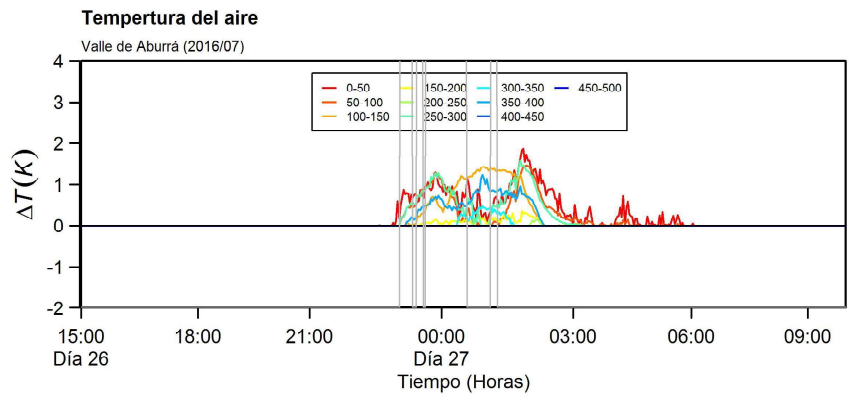
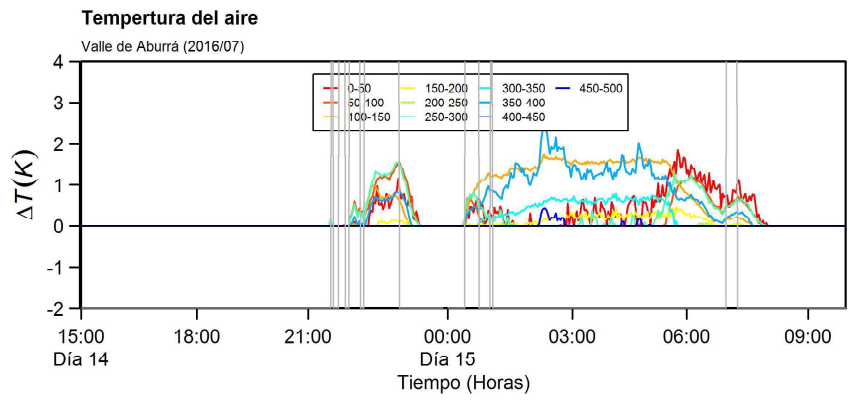
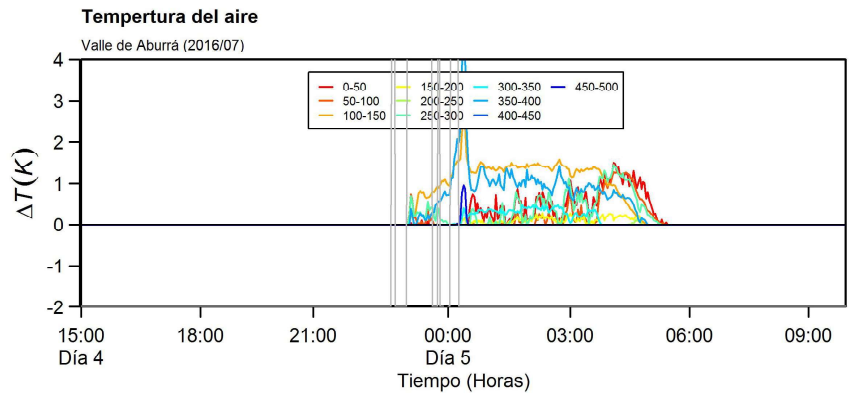
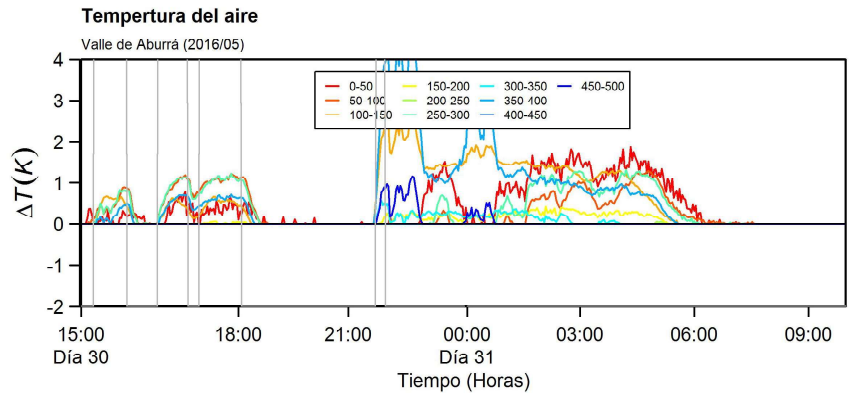




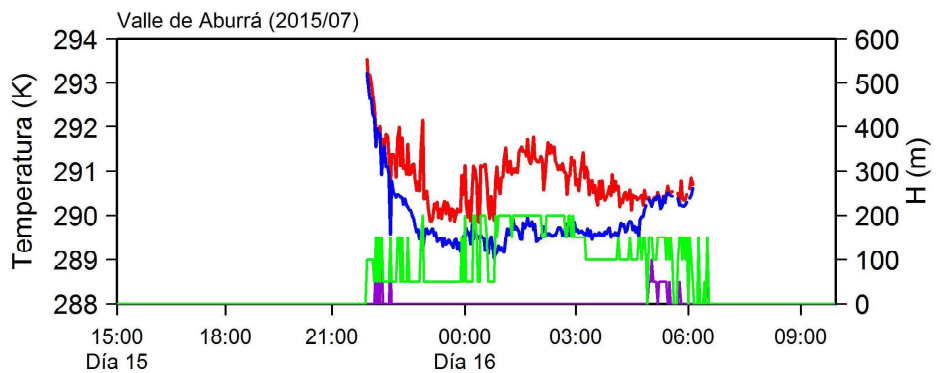
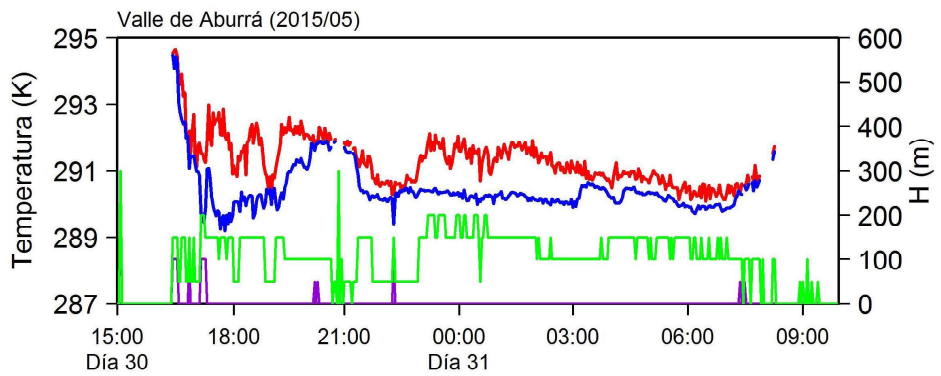
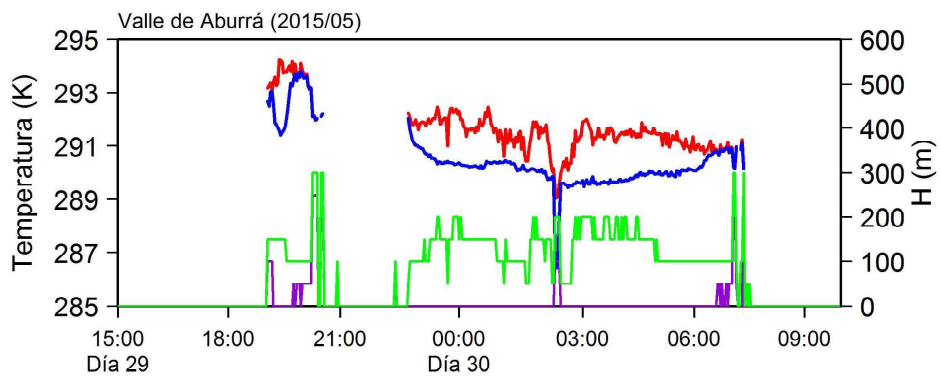
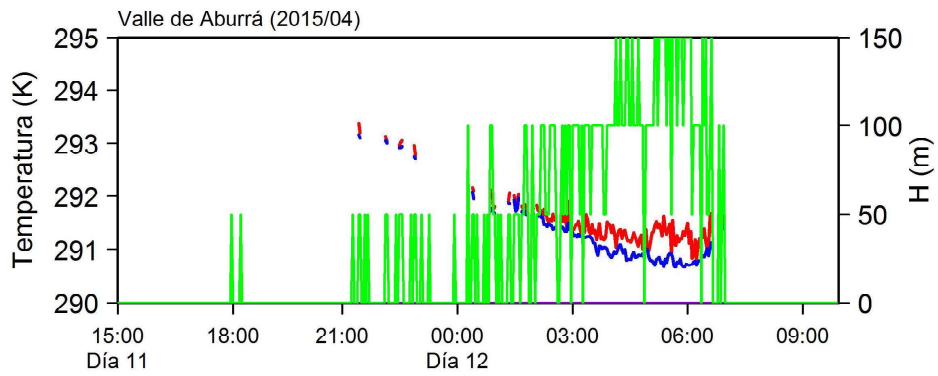
Anexo III: Gradientes positivos de temperatura real.

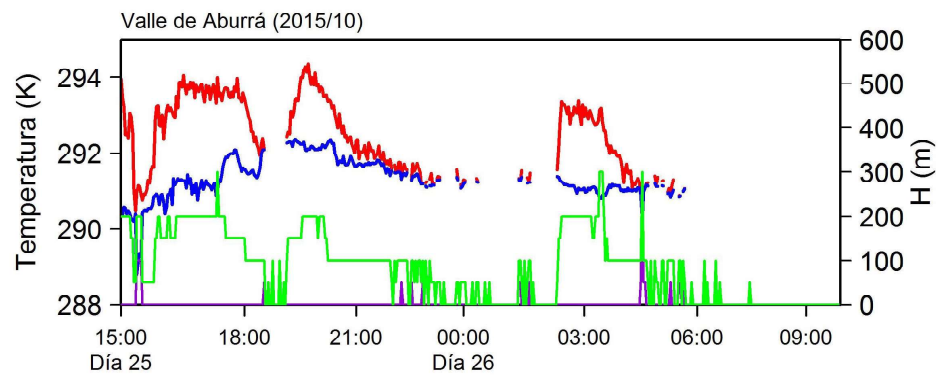
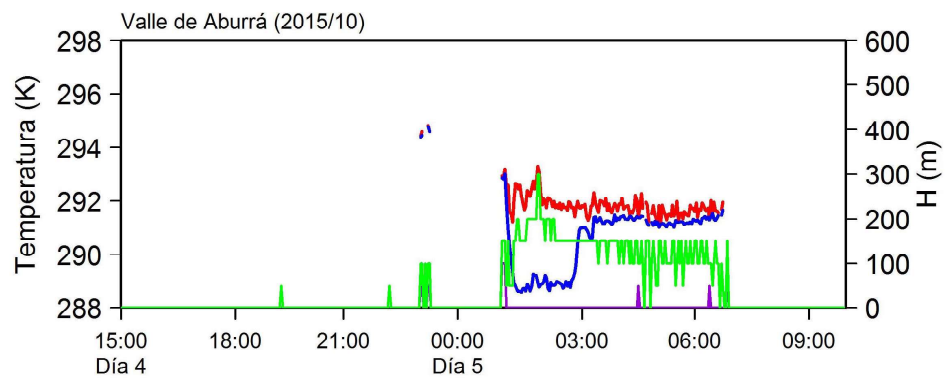
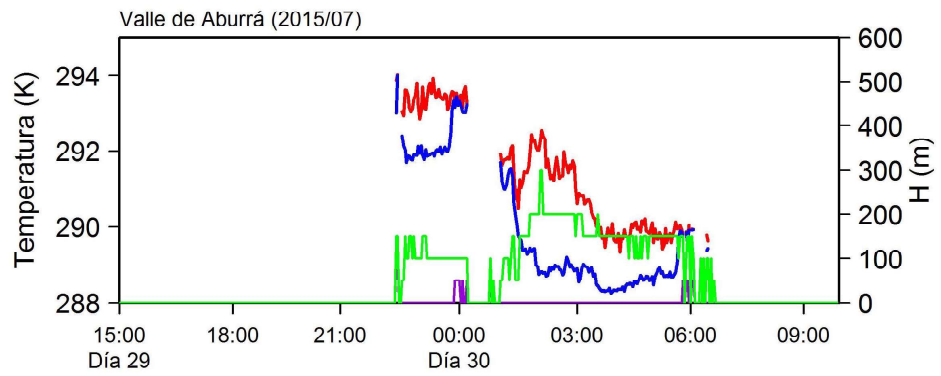
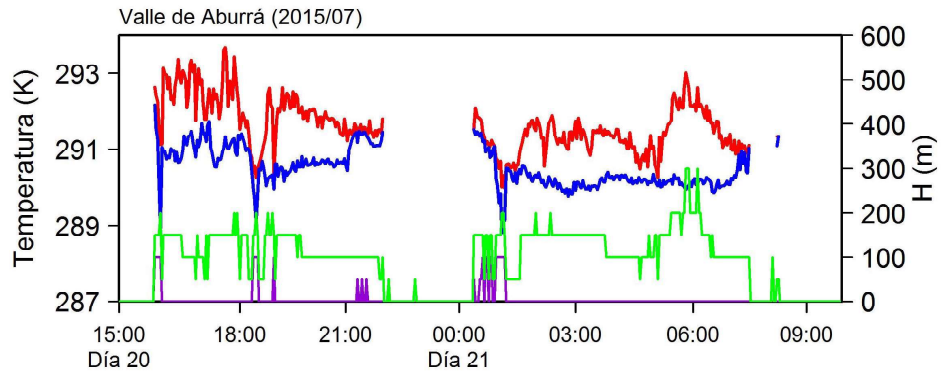


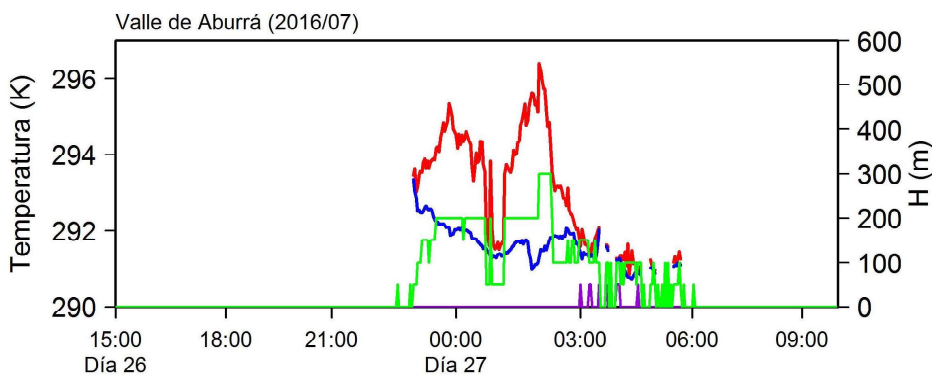
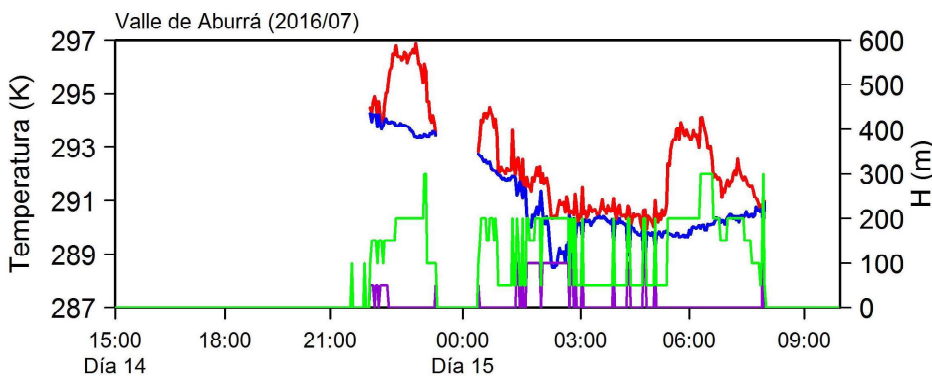
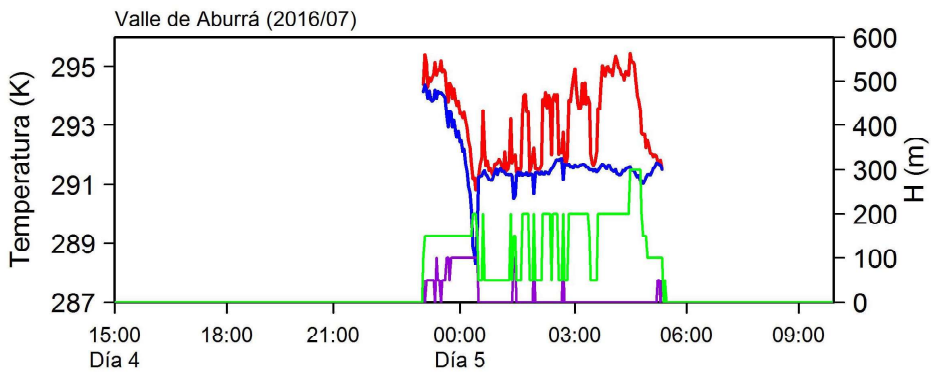
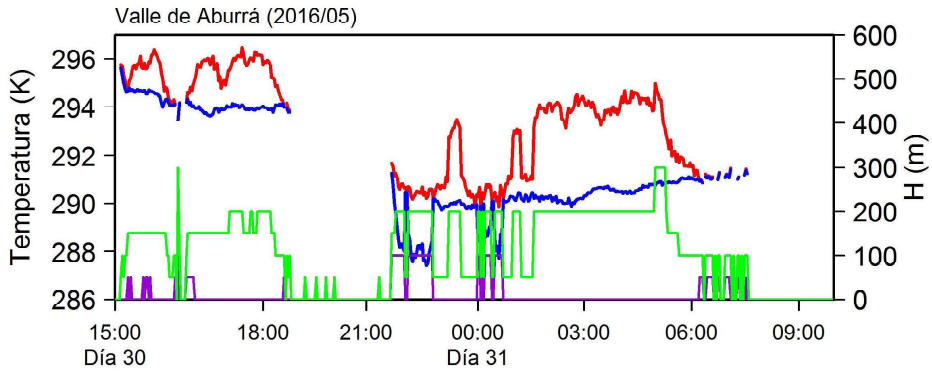




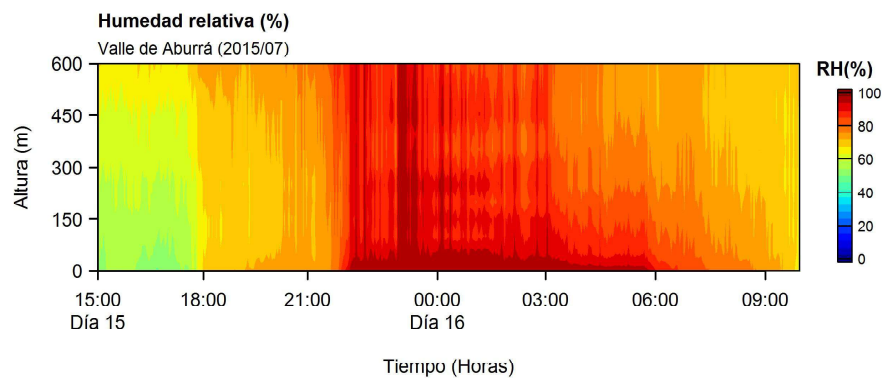
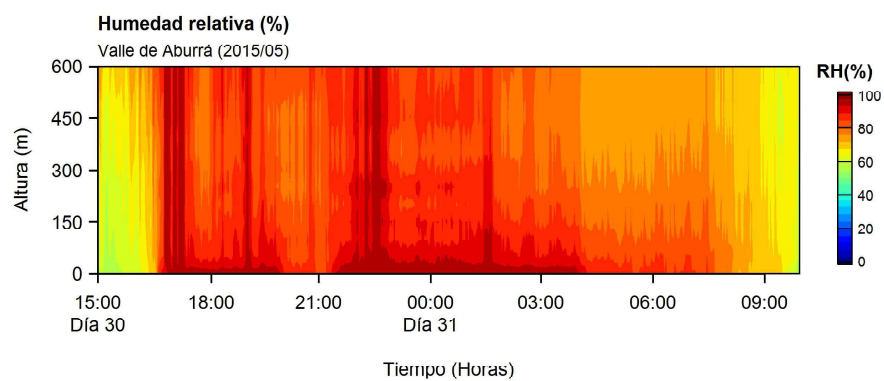
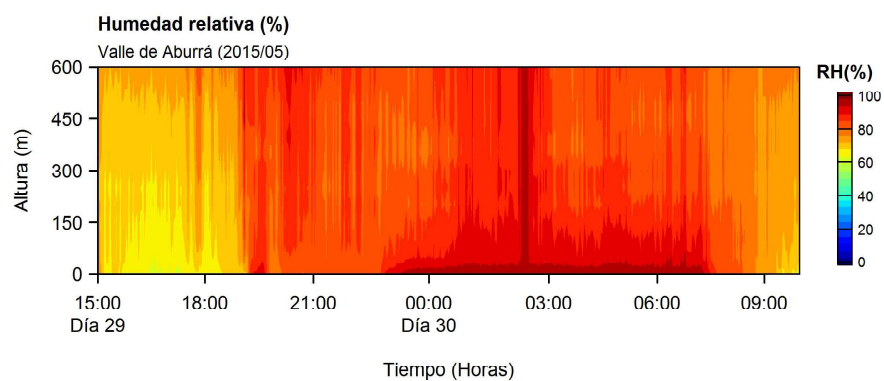
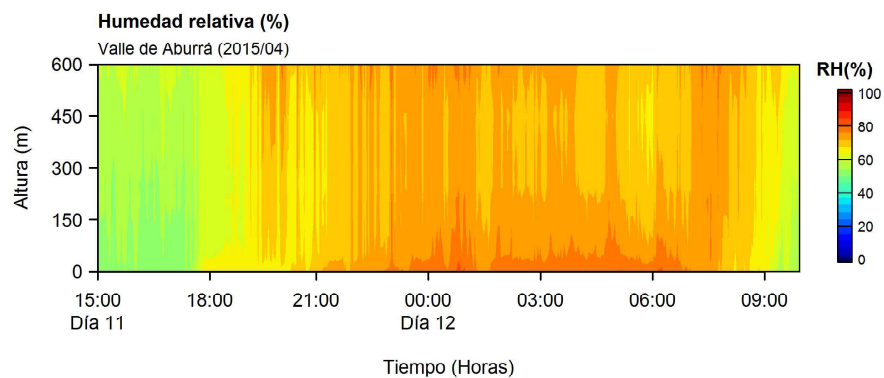
Anexo IV: Evolución de las capas de alta estabilidad.

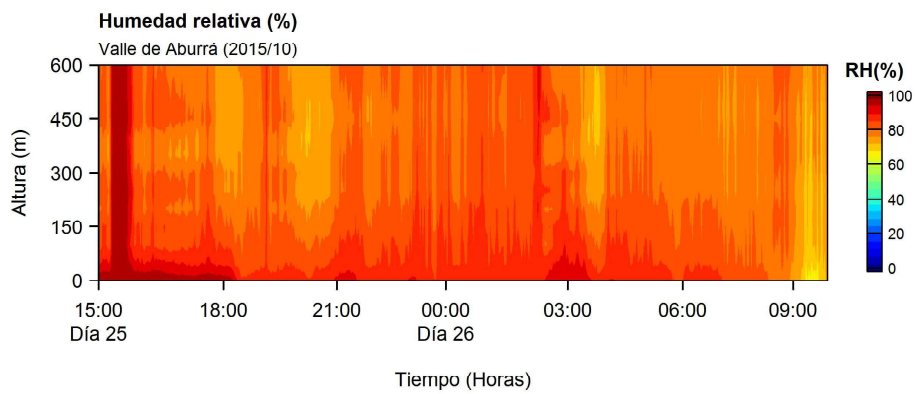
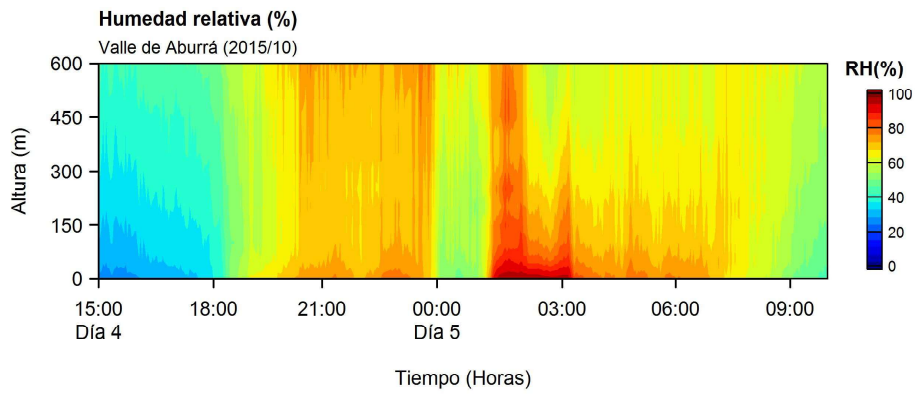
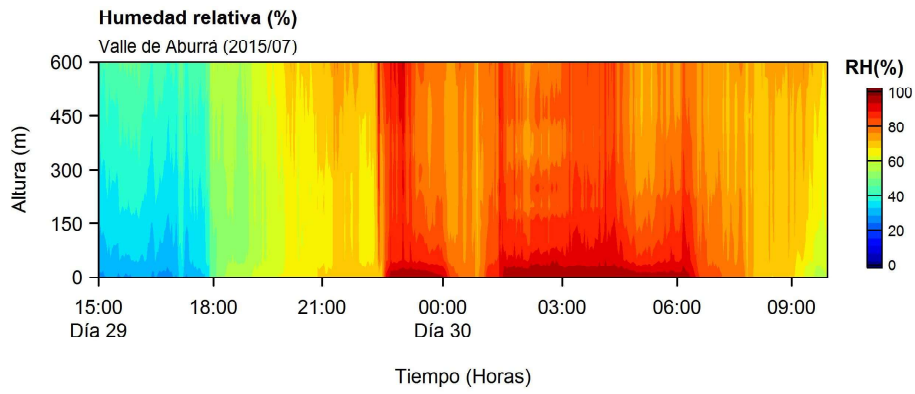
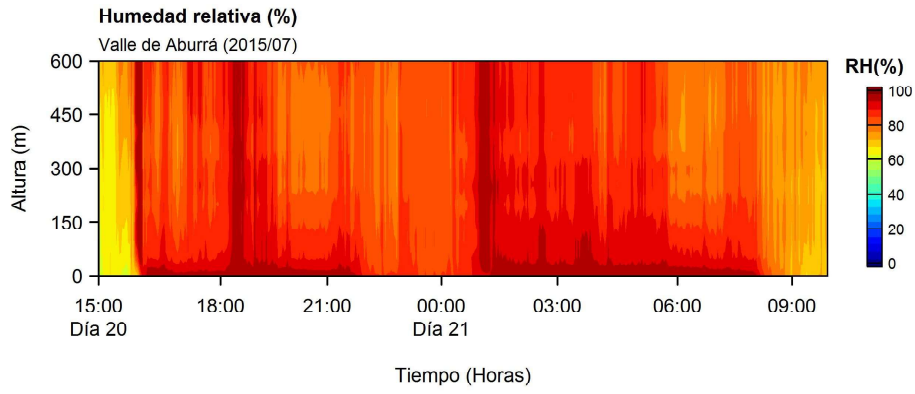


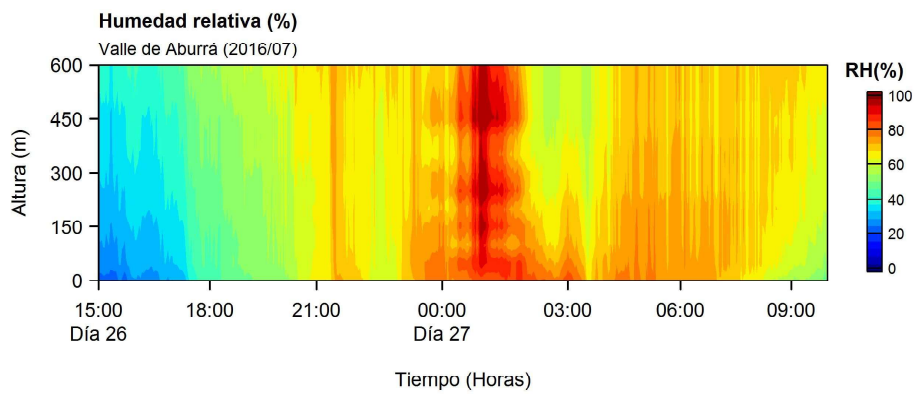
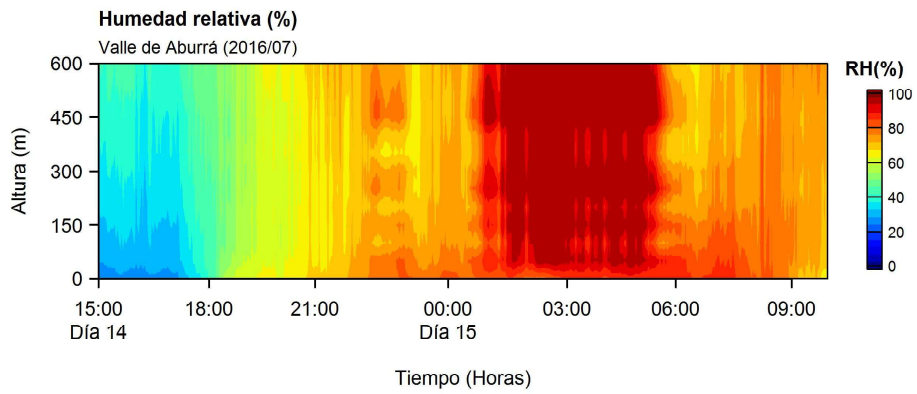
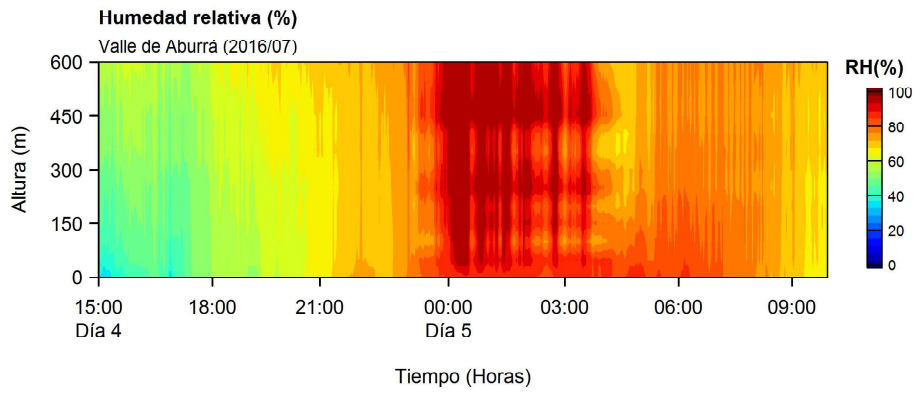
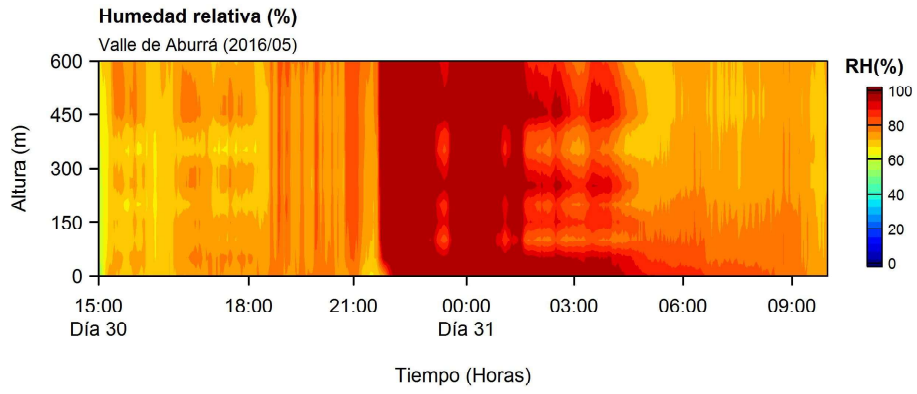




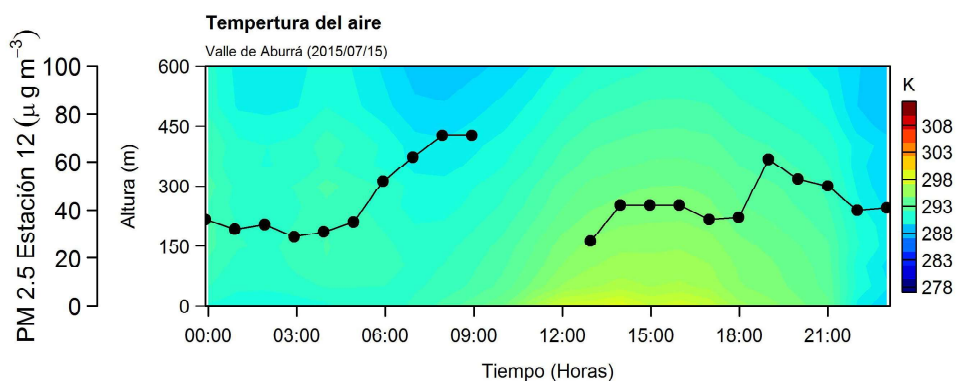
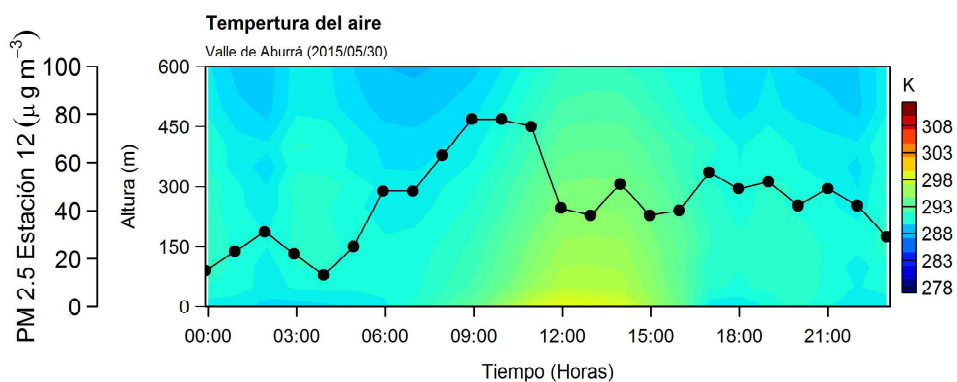
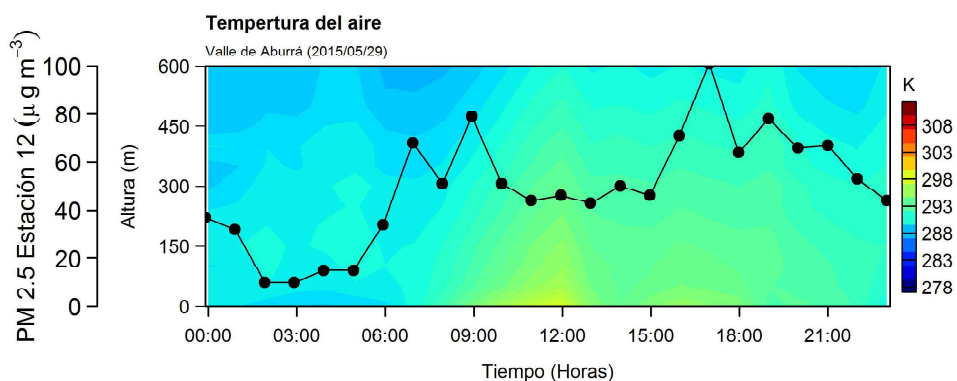
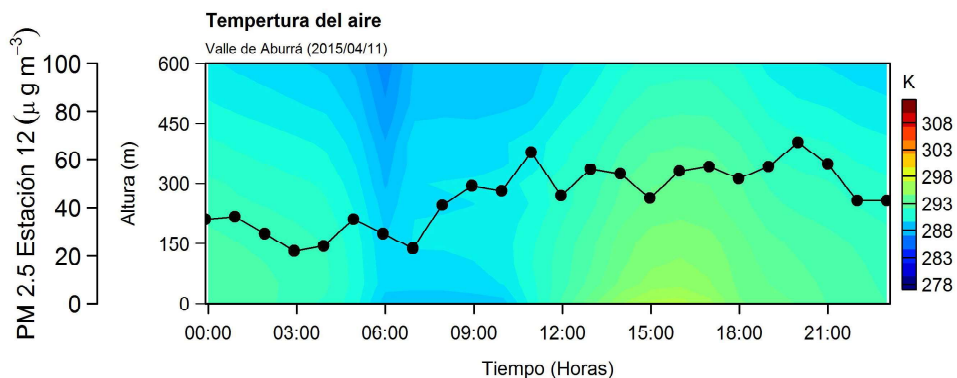
Anexo V: Contornos de humedad relativa (%).

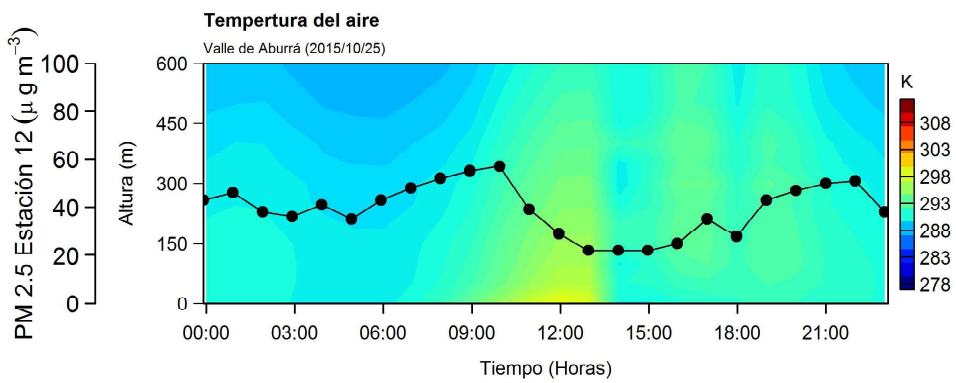
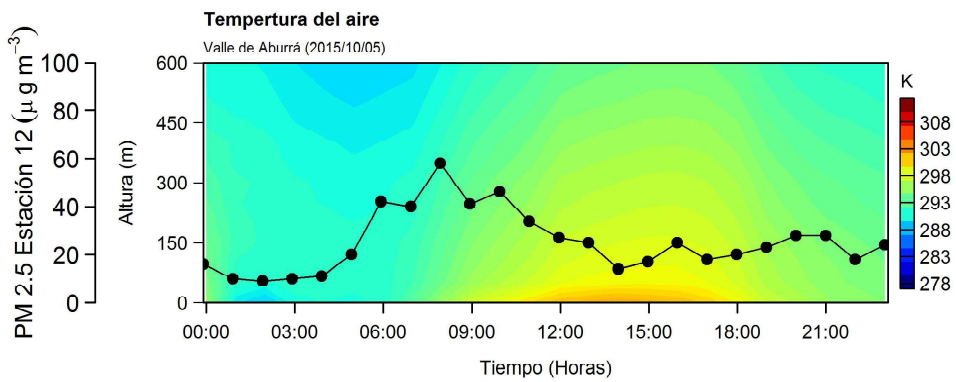
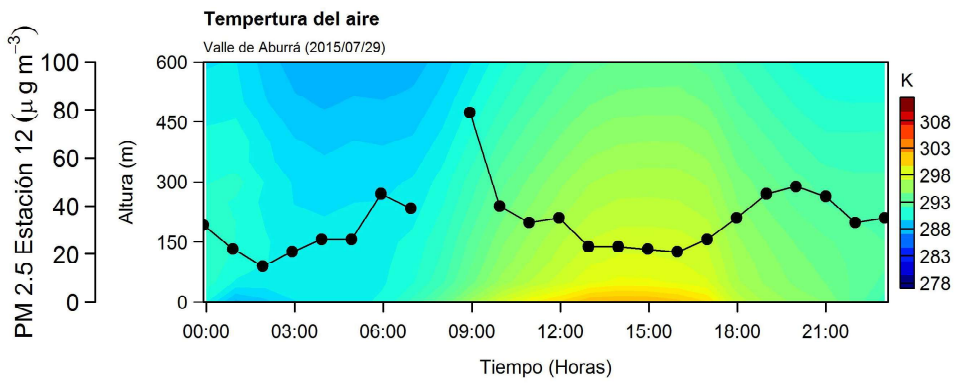
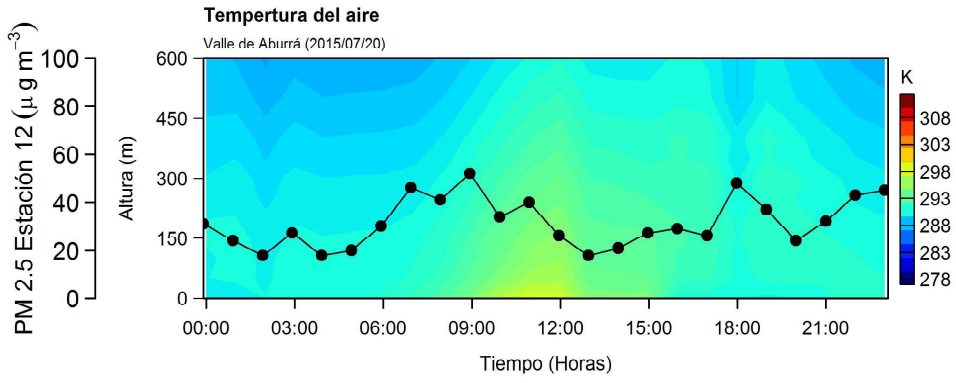


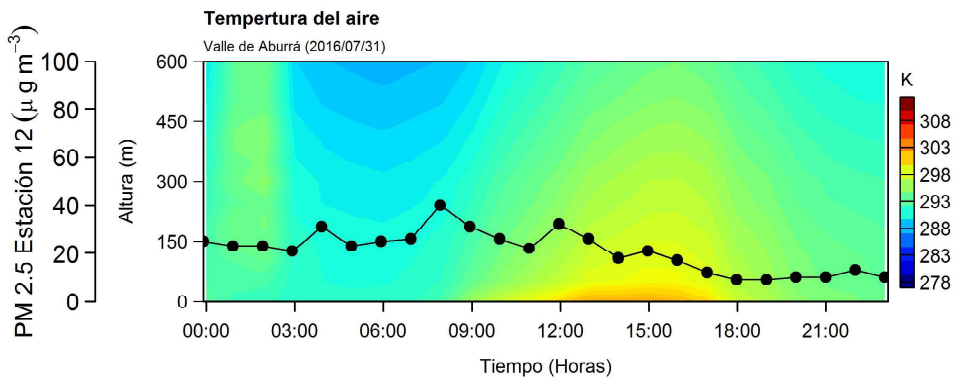
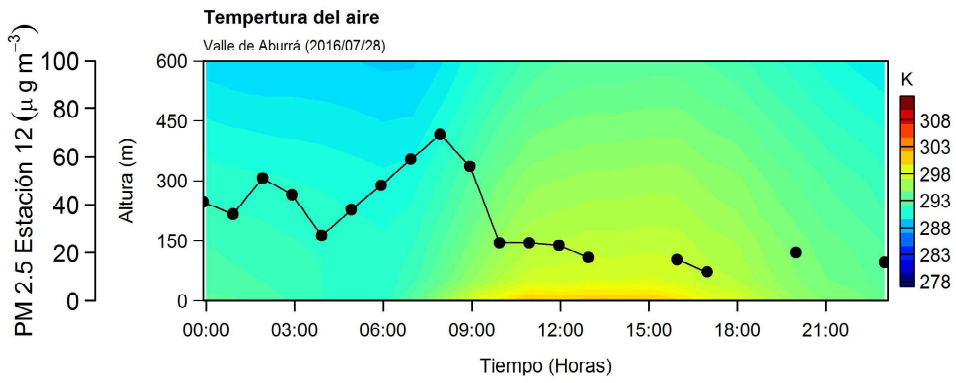
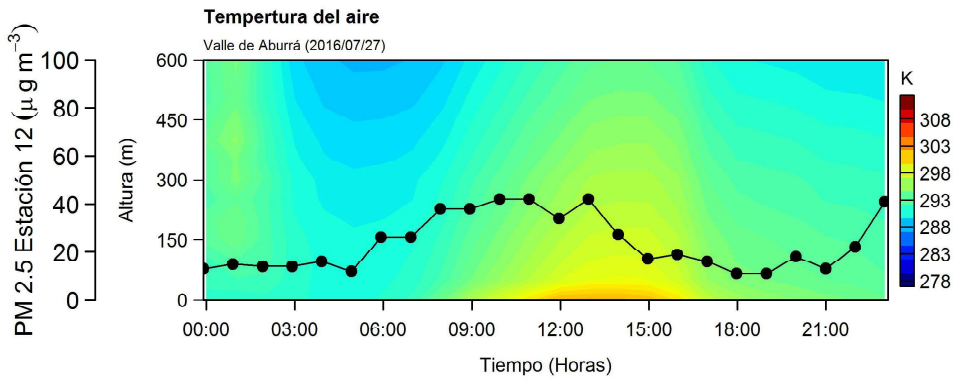
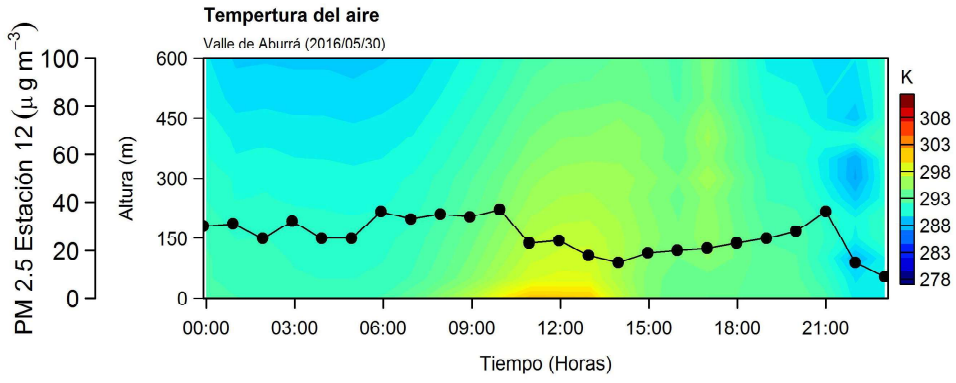




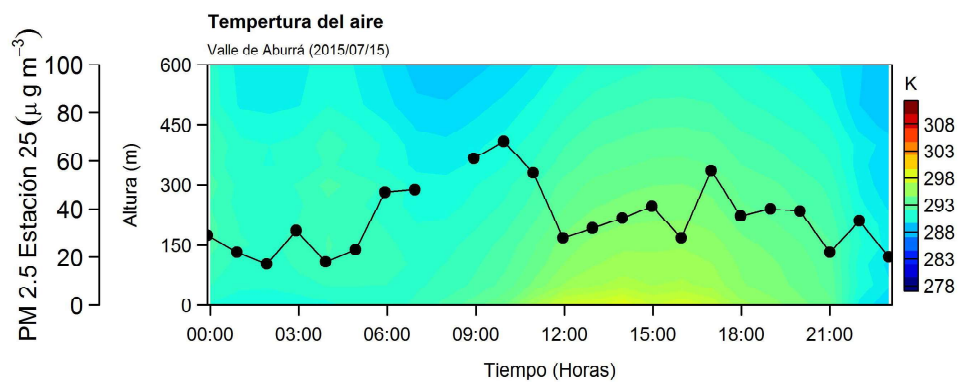
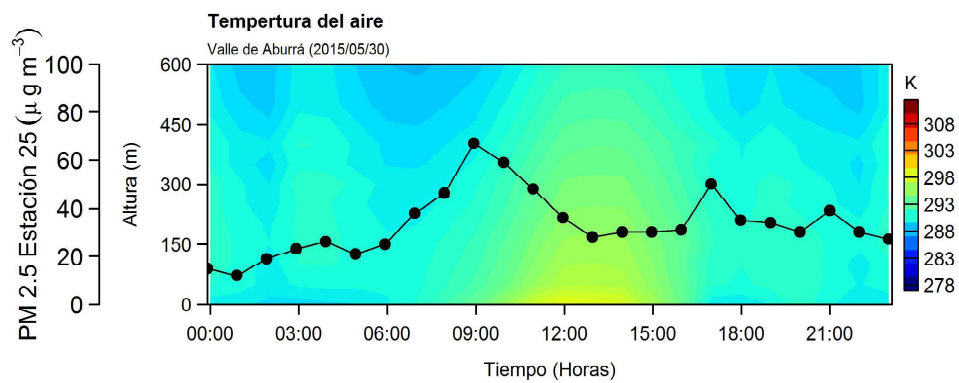
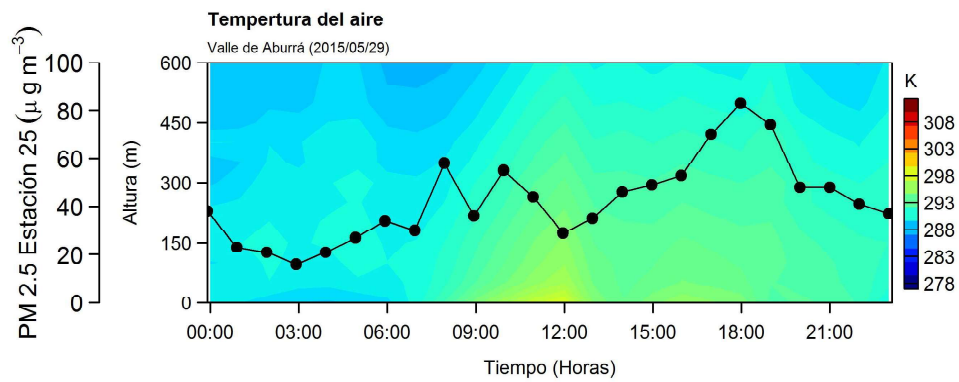
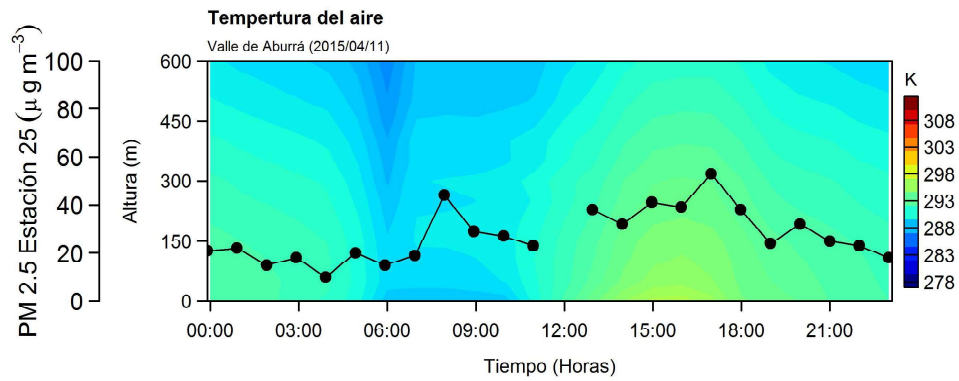
Anexo VI: Contornos de temperatura real y PM 2.5 en la estación “Museo de Antioquia”.

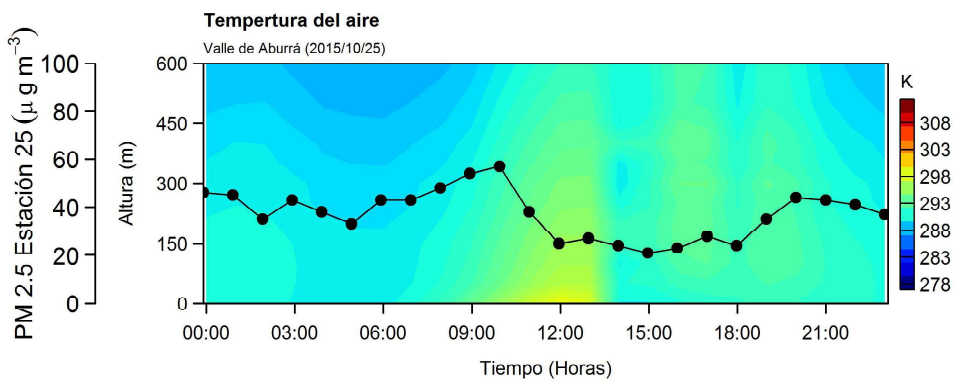
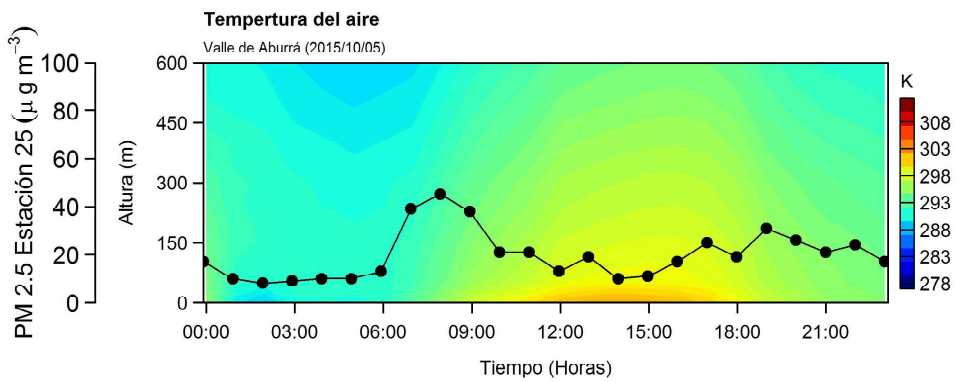
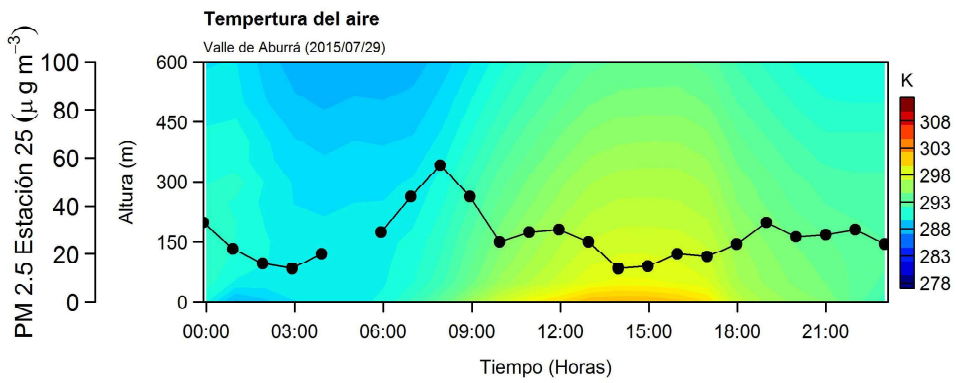
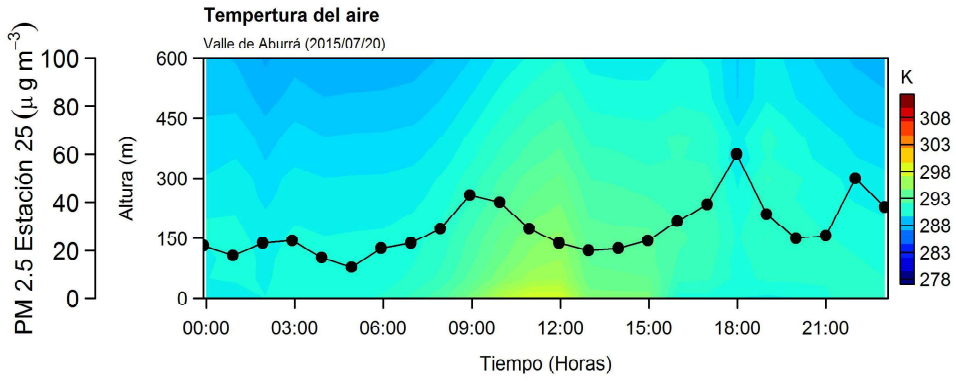


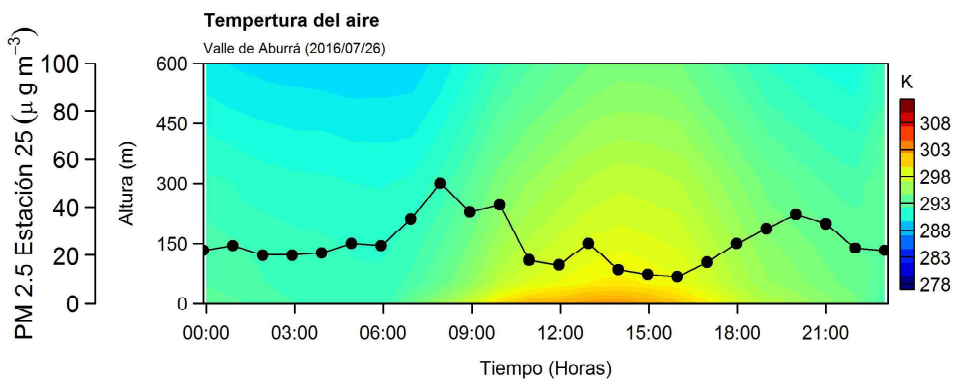
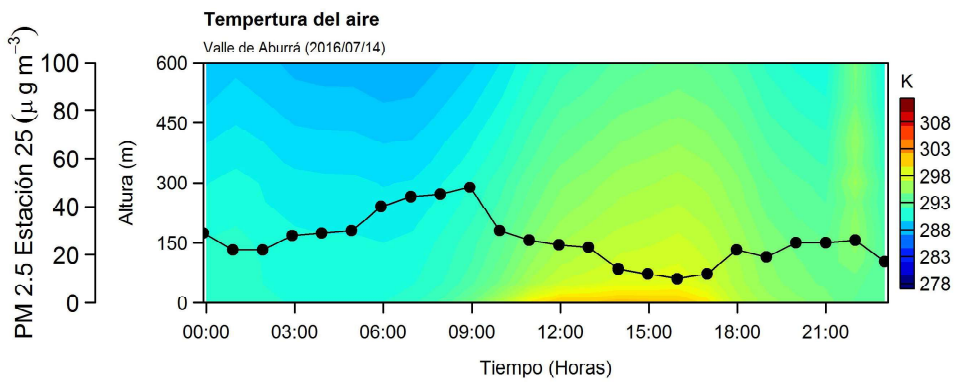
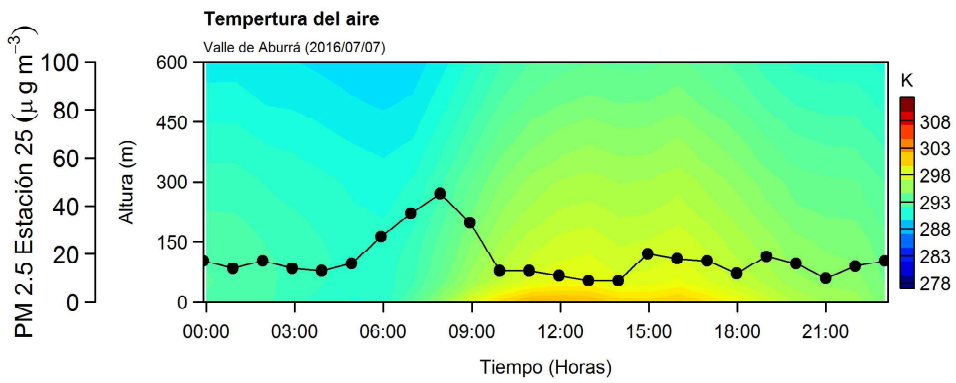
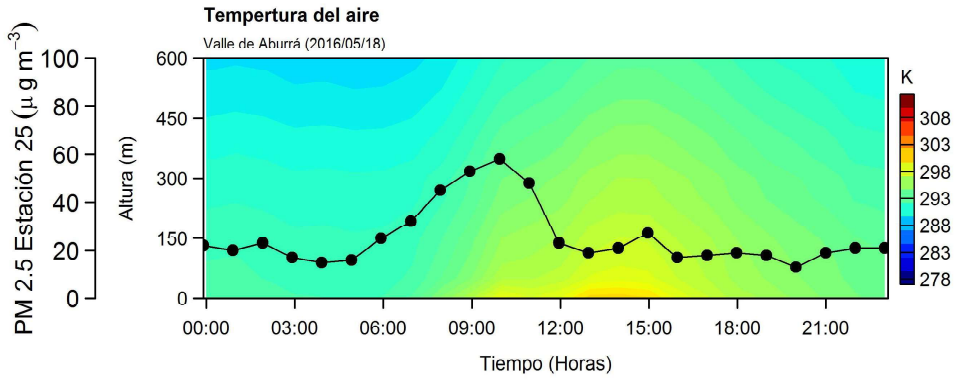




Anexo VII: Contornos de temperatura real y PM 2.5 en la estación “Universidad Nacional –Núcleo El Volador”.







Referencias

- Adarve, M. y Molina, P. (1984). Evaluación preliminar de la circulación de vientos en el valle de aburrá. *Revista Ainsa*, 4(1):5–24.
- Allen, M. (2015). Seasonal and diurnal patterns of temperature inversion formation and breakup in a topographically complex urban environment. *2015 NCUR*.
- AMVA-UPB, Á. M. d. V. d. A. U. P. B. (2017). Inventario de emisiones atmosféricas del valle de aburrá, actualización 2015. *Convenio de Asociación N° C.A. 335 de 2016. Sistema Integrado de Gestión de la Calidad del Aire – SIGAIRE.*, Informe de Avance(Febrero).
- André, J., De Moor, G., Lacarrere, P., y Du Vachat, R. (1978). Modeling the 24-hour evolution of the mean and turbulent structures of the planetary boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35(10):1861–1883.
- Anquetin, S., Guilbaud, C., y Chollet, J. (1998). The formation and destruction of inversion layers within a deep valley. *Journal of Applied Meteorology*, 37(12):1547–1560.
- Arango, M., Peláez, M., Agudelo, E., y Sánchez, L. (2016). Impacto clínico de la contaminación aérea. *Archivos de Medicina (Manizales)*, 16(2):373–384.
- Bach, W. (1970). An urban circulation model. *Theoretical and Applied Climatology*, 18(2):155–168.
- Bader, D. y McKee, T. (1985). Effects of shear, stability and valley characteristics on the destruction of temperature inversions. *Journal of climate and applied meteorology*, 24(8):822–832.
- Becerra, M., Sánchez, M., Carvajal, J., Luna, J., Peluffo, D., y Tobón, C. (2016). Data fusion from multiple stations for estimation of pm2. 5 in specific geographical location. En *Iberoamerican Congress on Pattern Recognition*, pp. 426–433. Springer.
- Bello, V. (2008). Las inversiones térmicas en el valle bajo del henares.
- Belorid, M., Chong, B., y Kim, J. (2011). Observational analyses of nocturnal temperature inversions in haean basin. *TERRECO Science Conference. Karlsruhe Institute of Technology. Garmisch-Partenkirchen, Germany*, pp. 374–374.
- Bornstein, R. (1968). Observations of the urban heat island effect in new york city. *Journal of Applied Meteorology*, 7(4):575–582.
- Bourne, S. (2008). *A climate perspective of observed and modeled surface-based temperature inversions in Alaska*. Tesis doctoral, University of Alaska Fairbanks.
- Brost, R. y Wyngaard, J. (1978). A model study of the stably stratified planetary boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35(8):1427–1440.
- Carvajal, A. y Pabón, J. (2016). Transformación de la superficie terrestre por la actividad humana y su relación con el cambio climático. *Sociedade and Natureza*, 28(2):185–198.
- Chen, L.-W., Watson, J. G., Chow, J. C., Green, M. C., Inouye, D., y Dick, K. (2012). Wintertime particulate pollution episodes in an urban valley of the western us: a case study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(21):10051–10064.
- Chen, R., Hu, B., Liu, Y., Xu, J., Yang, G., Xu, D., y Chen, C. (2016). Beyond pm 2.5: The role of ultrafine particles on adverse health effects of air pollution. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1860(12):2844–2855.

- Chu, P. C., Chen, Y., Lu, S., Li, Z., y Lu, Y. (2008). Particulate air pollution in lanzhou china. *Environment International*, 34(5):698–713.
- Clements, C., Whiteman, C., y Horel, J. (2003). Cold-air-pool structure and evolution in a mountain basin: Peter sinks, utah. *Journal of Applied Meteorology*, 42(6):752–768.
- Colette, A., Chow, F., y Street, R. (2003). A numerical study of inversion-layer breakup and the effects of topographic shading in idealized valleys. *Journal of Applied Meteorology*, 42(9):1255–1272.
- Correa, M., Zuluaga, C., Palacio, C., Pérez, J., y Jiménez, J. (2009). Acoplamiento de la atmósfera libre con el campo de vientos locales en una región tropical de topografía compleja. caso de estudio: Valle de aburrá, antioquia, colombia. *Dyna*, 76(158):17–27.
- Cuervo, C. (2017). *Caracterización del comportamiento del Vapor de agua y energía potencial convectiva disponible precedente a eventos de precipitación sobre el Valle de Aburrá*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Cushman-Roisin, B. (2014). *Environmental fluid mechanics*. Thayer School of Engineering. Dartmouth College. Hanover, New Hampshire. John Wiley and Sons, Inc.
- Feng, S., Gao, D., Liao, F., Zhou, F., y Wang, X. (2016). The health effects of ambient pm 2.5 and potential mechanisms. *Ecotoxicology and environmental safety*, 128:67–74.
- Garratt, J. (1993). Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary-layer treatments-a review. *Journal of Climate*, 6(3):419–448.
- Gobernación de Antioquia, G. (2017). Regiones y municipios de antioquia: valle de aburrá. <http://www.antioquia.gov.co/index.php/antioquia/regiones/valle-de-aburr> Accessed: 2017-12-20.
- Gómez, A., Henao, E., Molina, E., y Molina, F. (2017). Evaluation of total suspended particles (tsp) and respirable particles (pm10) in the zone of guayabal, medellín, colombia, 2000. *Revista Facultad de Ingeniería*, (30):24–33.
- Henao, C., Cartagena, C., Múnera, S., Ochoa, A., Jiménez, J., y Osorio, A. (2012). Detección del fenómeno de la inversión térmica por medio de la utilización de técnicas de tratamiento digital de imágenes basadas en sistemas de video.
- Henao, J., Salazar, J., Villegas, J., y Rendón, A. (2017). Amazon forest controls surface moisture via below-canopy temperature inversion: Potential forest loss-induced ecohydrological impacts. *Submitted to "Agricultural and Forest Meteorology"*.
- Hermelin, M. (2007). Valle de aburrá:¿ quo vadis? *Gestión y Ambiente, Volumen 10, No. 2, 2007, pp. 7-16*.
- Herrera, L. (2015). *Caracterización de la Capa Límite Atmosférica en el Valle de Aburrá a partir de la información de sensores remotos y radiosondeos*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Holmes, T., Crow, W., Hain, C., Anderson, M., y Kustas, W. (2015). Diurnal temperature cycle as observed by thermal infrared and microwave radiometers. *Remote Sensing of Environment*, 158:110–125.
- IDEAM, Instituto de hidrología, m. y. e. a. (2016). Boletín informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de variabilidad climática .el niñoz "la niña". *Boletín 84 y 95*.

- Janhäll, S., Olofson, K., Andersson, P., Pettersson, J., y Hallquist, M. (2006). Evolution of the urban aerosol during winter temperature inversion episodes. *Atmospheric Environment*, 40(28):5355–5366.
- Jiménez, J. (2016). Altura de la capa de mezcla en un área urbana, montañosa y tropical. caso de estudio: Valle de aburrá (colombia).
- Jiménez, J., Ochoa, A., y Henao, A. (2011). Acoplamiento del ciclo de salida del sol y el ciclo de los contaminantes atmosféricos en el valle de aburrá–colombia. En *IX Congreso colombiano de meteorología*. Bogotá.
- Kukkonen, Jaakko and Pohjola, Mia and Sokhi, Ranjeet S and Luhana, Lakhu and Kitwiroon, Nutthida and Fragkou, Lia and Rantamäki, Minna and Berge, Erik and Ødegaard, Viel and Slørdal, Leiv Håvard and others (2005). Analysis and evaluation of selected local-scale pm 10 air pollution episodes in four european cities: Helsinki, london, milan and oslo. *Atmospheric Environment*, 39(15):2759–2773.
- Largerón, Y. y Staquet, C. (2016). Persistent inversion dynamics and wintertime pm 10 air pollution in alpine valleys. *Atmospheric Environment*, 135:92–108.
- Li, L., Qian, J., Ou, C.-Q., Zhou, Y.-X., Guo, C., y Guo, Y. (2014). Spatial and temporal analysis of air pollution index and its timescale-dependent relationship with meteorological factors in guangzhou, china, 2001–2011. *Environmental Pollution*, 190:75–81.
- Liang, M. y Keener, T. (2015). Atmospheric feedback of urban boundary layer with implications for climate adaptation. *Environmental science and technology*, 49(17):10598–10606.
- Lin, C.-I., Wang, G.-H., Cho, C.-C., Wu, H. T., Hsieh, W.-Y., y Lin, C.-S. (2017). Disorder of renin-angiotensin system promoting the acute pulmonary inflammation by particulate matter 2.5 (pm_{2.5}) exposure. *The FASEB Journal*, 31(1 Supplement):854–6.
- López, L. (2016). El relieve de la zona central de antioquia: Un palimpsesto de eventos tectónicos y climáticos. *Revista Facultad de Ingeniería*, (10):9–24.
- Malek, E., Davis, T., Martin, R., y Silva, P. (2006). Meteorological and environmental aspects of one of the worst national air pollution episodes (january, 2004) in logan, cache valley, utah, usa. *Atmospheric research*, 79(2):108–122.
- Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric environment*, 33(24):4029–4037.
- McNider, R. y Pielke, R. (1981). Diurnal boundary-layer development over sloping terrain. *Journal of the atmospheric sciences*, 38(10):2198–2212.
- Mejía, O. y Jiménez, J. (2002). Procesos atmosféricos sobre terrenos complejos. *Meteorología Colombiana*, 6:33–44.
- Mesa, O. (2017). El cielo que perdimos en medellín. *periódico El Espectador*, 15 de mayo.
- Mesa, O., Poveda, G., y Carvajal, L. (1997). Introducción al clima de colombia. *Universidad Nacional de Colombia. Medellín*, 15 de mayo.
- Offerle, B., Grimmond, C., Fortuniak, K., y Pawlak, W. (2006). Intraurban differences of surface energy fluxes in a central european city. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(1):125–136.
- Oke, T. (1995). The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. En *Wind climate in cities*, pp. 81–107. Springer.

- Pérez, J., Palacio, C., y Jiménez, J. (2011). Aspectos descriptivos de la circulación en la capa límite atmosférica del valle de aburra. *Revista POLITÉCNICA. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid*, 7:31–41.
- Posada, J., Farbiarz, V., y González, C. (2011). Análisis del “pico y placa” como restricción a la circulación vehicular en medellín basado en volúmenes vehiculares.
- Radiometrics Corporation, R. (2013). Profiler operator’s manual: Mp-3000a, mp-2500a, mp-1500a. revision g.
- Rendón, A. (2007). *Rompimiento de la Inversión Térmica en el Valle de Aburrá. Medellín.* Tesis doctoral, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia.
- Rendón, A., Jiménez, J., y Palacio, C. (2007). *Rompimiento de la Inversión Térmica en el Valle de Aburrá.* Tesis doctoral, Tesis de Maestría], Medellín, Ant: Universidad Nacional de Colombia.
- Rendón, A., Salazar, J., Palacio, C., y Wirth, V. (2015). Temperature inversion breakup with impacts on air quality in urban valleys influenced by topographic shading. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(2):302–321.
- Rendón, A., Salazar, J., Palacio, C., Wirth, V., y Brötz, B. (2014). Effects of urbanization on the temperature inversion breakup in a mountain valley with implications for air quality. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(4):840–858.
- Ríos, C. (2001). Procesos de inversión térmica en el valle de aburrá. *Trabajo dirigido de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia.*
- Ross, H., Limb, E., Bland, J., De Leon, A., Strachan, D., y Bower, J. (1995). Health effects of an air pollution episode in london, december 1991. *Thorax*, 50(11):1188–1193.
- Rutllant, J. y Garreaud, R. (1995). Meteorological air pollution potential for santiago, chile: towards an objective episode forecasting. *Environmental Monitoring and Assessment*, 34(3):223–244.
- Sabzevari, A., Panahi, A., y Hashemi, M. (2014). The study and investigation on temperature inversion and effective factors on tehran air pollution by means of statistical climatic analyses and gis system. *Advances in Environmental Biology*, pp. 1651–1659.
- Sarrat, C., Lemonsu, A., Masson, V., y Guedalia, D. (2006). Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric environment*, 40(10):1743–1758.
- Savov, P., Skakalova, T., Kolev, I., y Ludwig, F. (2002). Lidar investigation of the temporal and spatial distribution of atmospheric aerosols in mountain valleys. *Journal of Applied Meteorology*, 41(5):528–541.
- Toro, M. y Quiceno, D. (2015). Energy demand and vehicle emissions stimate in aburra valley from 2000 to 2010 using leap model. *Dyna*, 82(189):45–51.
- Uribe, E. (2004). Air pollution management in two colombian cities: Case study. *Desarrollo y Sociedad*, (54).
- Wallace, J., Corr, D., y Kanaroglou, P. (2010). Topographic and spatial impacts of temperature inversions on air quality using mobile air pollution surveys. *Science of the total environment*, 408(21):5086–5096.

- Wang, Y., Cao, X., He, T., Gao, F., Hua, D., y Zhao, M. (2015). Observation and analysis of the temperature inversion layer by raman lidar up to the lower stratosphere. *Applied optics*, 54(34):10079–10088.
- Whiteman, C. (1982). Breakup of temperature inversions in deep mountain valleys: Part i. observations. *Journal of Applied Meteorology*, 21(3):270–289.
- Whiteman, C. y McKee, T. (1980). Breakup of temperature inversions in colorado mountain valleys. *Climatology report; 80-2*.
- Whiteman, C. y McKee, T. (1982). Breakup of temperature inversions in deep mountain valleys: Part ii. thermodynamic model. *Journal of applied Meteorology*, 21(3):290–302.
- Whiteman, C. y Müller, H. (1988). Breakup of a nocturnal temperature inversion in the dischma valley during diskus. *Journal of applied Meteorology*, 27(2):188–194.
- Whiteman, C. D. (1990). Observations of thermally developed wind systems in mountainous terrain. En *Atmospheric processes over complex terrain*, pp. 5–42. Springer.
- Whiteman, C. D. (2000). *Mountain meteorology: fundamentals and applications*. Oxford University Press.
- Yao, W. y Zhong, S. (2009). Nocturnal temperature inversions in a small, enclosed basin and their relationship to ambient atmospheric conditions. *Meteorology and atmospheric physics*, 103(1):195–210.
- Yasmeen, Z. (2011). Inversion layer and its environmental impact over karachi. *Pakistan Journal of meteorology*, 7(14).
- Zapata, C., Cano, N., y Ramirez, M. (2016). Pm2. 5/pm10 relationship in the metropolitan area of valle de aburrá, colombia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 207:111–120.
- Zapata, C., Cano, N., Ramírez, M., Rubiano, C., y Jiménez, J. (2015). Influence of the extreme phases of the enso phenomenon (el niño and la niña) on air quality in the metropolitan area of the aburrá valley (colombia). *WIT Transactions on The Built Environment*, 168:663–675.
- Zoumakis, N. y Efstathiou, G. (2006). Parameterization of inversion breakup in idealized valleys. part ii: Thermodynamic model. *Journal of applied meteorology and climatology*, 45(4):609–623.