

Cuencas atmosféricas, una variable ambiental para la planificación territorial. Estudio de caso: Valle de Sogamoso, Boyacá, Colombia

Airsheds—An Environmental Variable for Territorial Planning: A Case Study of Sogamoso Valley, Boyacá, Colombia

Alfonso AVELLANEDA-CUSARÍA
Universidad El Bosque
Colombia

Daniela CAMELO-OLARTE
Profesional en ingeniería ambiental
Colombia

Natalia VALBUENA-CHÁVEZ
Profesional en ingeniería ambiental
Colombia

Ernesto CAETANO
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México
México

Clemente LÓPEZ-BRAVO
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México
México

Resumen

Se presenta el análisis preliminar de cuencas atmosféricas con origen en el Valle de Sogamoso, Boyacá, Colombia, mediante la modelación del comportamiento de las parcelas de aire como herramienta para la planificación territorial. El estudio de caso se sitúa en uno de los corredores industriales de mayor emisión de contaminantes en Colombia, por tanto, es importante conocer el comportamiento de las variables meteorológicas, la topografía de la zona y la dinámica atmosférica que allí se desarrolla como consecuencia de relacionar las dos variables, para lograr la conformación y delimitación de la cuenca atmosférica. Se calculó por medio del modelo HYSPLIT, las trayectorias de parcelas de aire hacia adelante durante los meses de febrero y abril, estableciendo las temporadas secas y húmedas del año 2015. Se observó la circulación de parcelas

de aire provenientes del Valle, hacia territorios que han presentado altos índices en contaminación atmosférica para el contaminante PM_{10} y se evidenció la relación de las variables meteorológicas y topográficas para delimitar la cuenca. Se proponen criterios para la planificación y ordenamiento territorial desde el enfoque de cuencas atmosféricas como unidad de gestión regional y apoyo a los sistemas de monitoreo de calidad del aire, con el fin de establecer una variable ambiental como eje principal para la toma de decisiones territoriales.

Palabras clave: planificación territorial, cuencas atmosféricas, parcelas de aire, trayectorias de parcelas, dinámica atmosférica

Abstract

A preliminary characterization analysis of airshed originating in Sogamoso Valley, Boyacá, using air parcel trajectories as a tool for territorial planning. In this context, in order to establishing and identify the probably border of airshed was based on knowing the behavior of the meteorological variables and topography of the study area, was calculated with the HYSPLIT model air parcel trajectories during the months of February and April where the dry and wet seasons of 2015 were established. Results allow identify a possible connection with air quality and the circulation of air parcel from Sogamoso Valley a study area where one of the industrial corridors with the highest emission of pollutants is located, to other regions that have presented high air pollution indices for the PM_{10} pollutant and the relationship of meteorological and topographic variables for the demarcation of the airshed was evidenced. From this it is proposed this methodology as criteria for territorial planning as a management unit and support for air quality monitoring systems, in order to establish an environmental variable as main axis for territorial decision making.

Keywords: territorial planning, airshed, air parcel, trajectories, atmospheric dynamics, air pollution

Introducción

Los procesos de planificación territorial en Colombia se han modificado de acuerdo con la necesidad de implementar metodologías que incluyan al componente ambiental como eje principal en la gestión del territorio, en el que se reconozcan los reales problemas asociados a las transformaciones del medio rural y urbano, e incorporando una planificación encaminada a una relación entre ambiente y un desarrollo sostenible (Rengifo, 2012). A partir de esto, se deberían definir nuevos componentes socio-ecológicos para

la toma de decisiones a escala municipal, regional o departamental que establezcan las bases para lograr la sostenibilidad en el territorio, tomando en cuenta los ejercicios de ordenamiento territorial como la ha sido la Estructura Ecológica Principal (EEP), las cuencas hidrográficas o la zonificación ecológica permitiendo fortalecer la gestión ambiental territorial (Márquez y Valenzuela, 2008; Villegas Rodríguez, 2014).

Como respuesta ante la necesidad de crear mecanismos que permitan la organización territorial basada en los componentes de los sistemas socio-ecológicos, el presente estudio de caso pretende utilizar preliminarmente el concepto de las cuencas atmosféricas como una herramienta en la planificación territorial en el Valle de Sogamoso, pues es una zona en la que confluyen factores naturales y antrópicos como el espacio geográfico definido a partir de variables topográficas y meteorológicas, así como la influencia de fuentes de emisión contaminantes, o por el transporte de contaminación atmosférica desde otras regiones.

De acuerdo con la Environmental Protection Agency (EPA), es imprescindible comprender la meteorología, la contaminación, la influencia y la dispersión de las sustancias emitidas (EPA, 1982), ya que esta información permite desarrollar planes orientados a diagnosticar y predecir el impacto ambiental (Iniestra y Caetano, 2008a), evitando la generación de conflictos por el uso y la ocupación inadecuada del espacio. Contrario a esta directriz, se advierte que las estrategias implementadas en áreas industriales de Boyacá han resultado insuficientes frente al control de emisiones, y por ende prevaleciendo eventos de contaminación permanente que sumado a las condiciones meteorológicas desfavorables inducen a la afectación de la salud pública (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2016a: 156-157).

El uso de cuencas atmosféricas permite el conocimiento detallado de la atmósfera a través de la modelación meteorológica, incluyendo la calidad del aire como instrumento de apoyo para la toma de decisiones desde un marco político, social y ambiental (Iniestra y Caetano, 2008b).

El objetivo de la investigación fue identificar de manera preliminar las cuencas atmosféricas en el Valle de Sogamoso, Boyacá, ubicado en la región norandina, mediante la simulación del comportamiento de la circulación atmosférica regional. De acuerdo con esto, se llevó a cabo una revisión de las condiciones climáticas y meteorológicas de Colombia y localmente del Valle de Sogamoso durante el periodo de 1981-2010 y el año 2015, con el fin de identificar el comportamiento de las variables de viento, temperatura, precipitación y humedad relativa en una escala regional y local y la influencia de la topografía presentado en el Valle como un factor determinante para la comprensión de los fenómenos meteorológicos.

A partir de los resultados obtenidos, se establecieron los posibles periodos en los cuales las condiciones meteorológicas podrían favorecer o no la dispersión y el transporte de contaminantes atmosféricos emitidos desde la zona de estudio. Las parcelas de aire se analizaron con el modelo Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPPLIT) (Stein, Draxler, Rolph, Stunder y Cohen, 2015). Para ello se estableció una estación seca y una húmeda, donde los periodos secos impiden que

los contaminantes se dispersen debido a vientos débiles, y en periodos húmedos se limita y disminuye su concentración por la precipitación (lavado atmosférico).

Los resultados obtenidos con el modelo revelaron las frecuencias con las cuales las trayectorias son transportadas de una región a otra, definiendo los límites probables de la cuenca atmosférica basados en criterios de topografía y meteorología, esto con el fin de conocer cuál es la influencia de las emisiones del Valle de Sogamoso sobre otras regiones. Por último, se proponen criterios para la planificación y gestión ambiental territorial a partir de las cuencas atmosféricas como herramienta útil para este propósito.

Si bien los resultados de la investigación se han socializado ante entidades públicas y privadas, aun no se ha consolidado el concepto de cuencas atmosféricas en los procesos de planificación, aun así, este término se ha logrado expandir y en algunas ciudades como Medellín ha sido acogido mediante acuerdos metropolitanos que adopta el plan de descontaminación del aire en áreas metropolitanas. Aun se sigue presentando los resultados y la factibilidad del proyecto ante entidades gubernamentales para lograr consolidar la variable en las metodologías de planificación.

Área de estudio

La región de estudio seleccionada es el Valle de Sogamoso, Boyacá, Colombia, ubicado sobre la cordillera oriental de los Andes a una altura de 2,568 m s. n. m. y con una superficie de 388 km², el cual forma parte de la región Andina. El Valle está integrado por los municipios de Belencito, Nobsa y Tibasosa al norte; Duitama, Paipa y Tuta en el centro; y Combita y Tunja al sur del Valle (Uribe Barón y Suárez Araque, 2009). Este territorio es considerado una zona de depresión topográfica alargada, ubicado en dirección Suroeste-noreste de la cordillera Oriental de los Andes y hacia el norte por el Macizo Iguaque. Comprende elevaciones desde 2,556 a 3,523 m s. n. m., limita con la Loma Carrizal y el Cerro Tugón y en el interior de esta zona pasa el Río Chicamocha (Figura 1), conformando parte de la región de Boyacá.

En la zona de estudio se encuentra uno de los corredores industriales de mayor emisión de contaminantes de las cinco regiones continentales de Colombia (Uribe Barón *et al.*, 2009), el cual posee una longitud de 87.6 km y junto a este se sitúan industrias de gran importancia a nivel nacional e internacional. En la ciudad de Tunja predomina el uso de hornos para la fabricación de ladrillos y la industria de Licores Boyacá; en Nobsa la actividad industrial cementera con empresas como Argos y Holcim, Acerías Paz del Río y en Sogamoso, en el sector metalúrgico, se encuentra la industria militar Indumil y la siderúrgica Sidenal, para Duitama, se destaca el sector transporte con Autobuses AGa e Invicar, así como Postobón como industria de producción de bebidas (Rodríguez, 2002), en Tibasosa la producción de bebidas con la planta de Bavaria y por último, tres unidades de la termoeléctrica Gensa y la Unidad Termosochagota en Paipa e industrias artesanales que se destacan por ser los mayores aportantes de contaminación atmosférica del Valle.

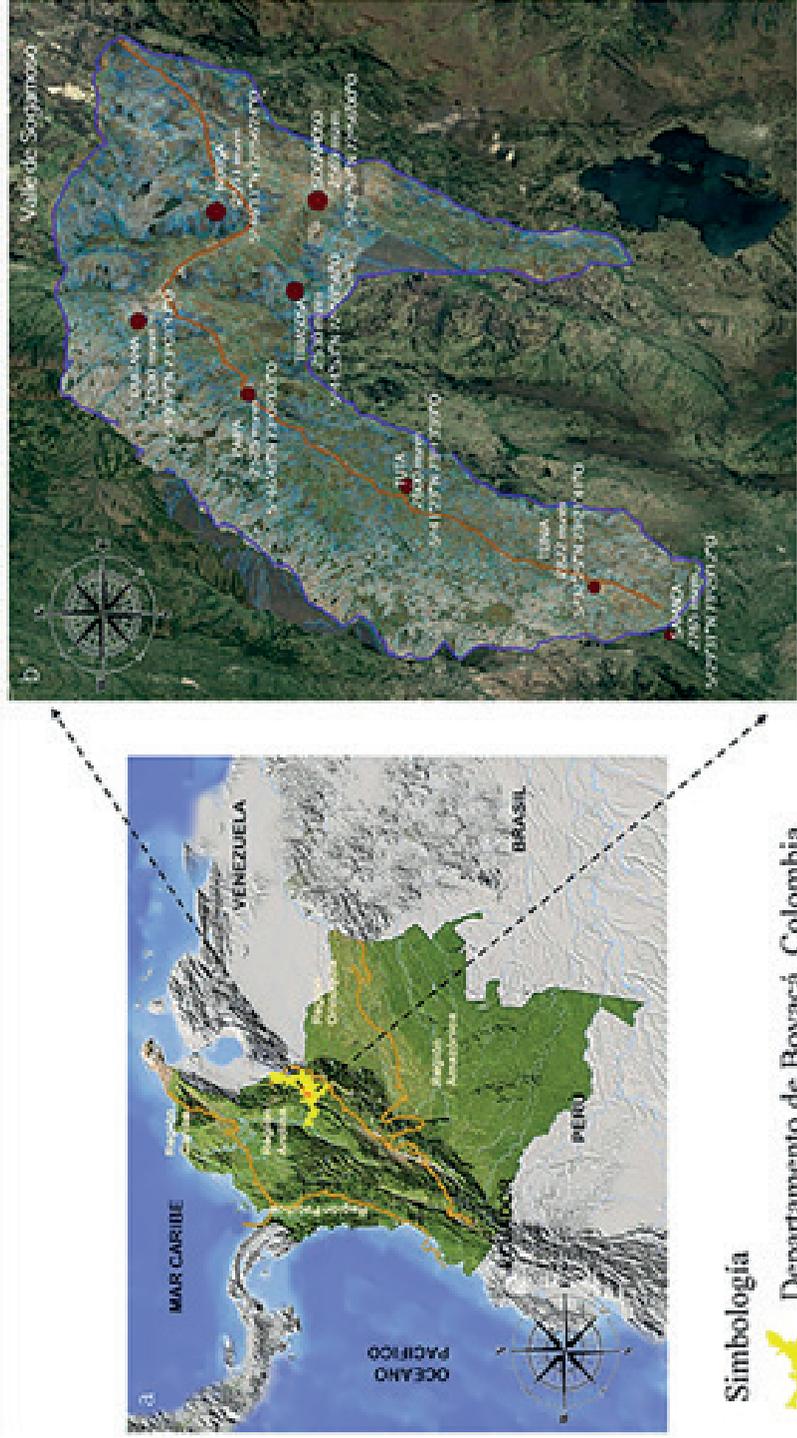


Figura 1. a) Mapa general de Colombia. b) Ubicación del Valle de Sogamoso en el departamento de Boyacá, Región Andina y Colombia. Fuente: Elaboración de los autores a partir de imágenes adaptadas de *Arcgis* y *Google Earth*.

Metodología

No existe una definición única y concreta de cuencas atmosféricas ni metodologías para delimitar una cuenca, por lo cual, la presente investigación para Colombia, tuvo como referencia la definición de cuencas atmosféricas, la metodología propuesta por Iniestra *et al.* (2008a), se fundamenta en conocer el comportamiento de las principales variables meteorológicas, la topografía de la zona de estudio y cómo éstas variables pueden influir en la dispersión y transporte de contaminantes a través de las parcelas de aire.

A partir de esta información, para el estudio de caso del Valle de Sogamoso, se usó el modelo HYPPLIT, un modelo que realiza el cálculo de trayectorias, concentraciones y dispersión en conjunto con datos meteorológicos. A diferencia de otros modelos, este permite el análisis atmosférico a través de una descripción matemática, estableciendo una relación causa-efecto (Draxler y Rolph, 2003). Es así como se describe, la manera en que una parcela de aire se mueve bajo el efecto de los vientos dominantes a grandes distancias y allí, no se considera que exista un intercambio entre la parcela y su alrededor. Ver anexos.

El modelo considera los datos meteorológicos globales en conjunto con datos de contaminantes atmosféricos con el fin de analizar trayectorias de parcelas de aire hacia adelante, de acuerdo con un tiempo determinado, para obtener como resultado, mediante la técnica estadística de clúster, una dirección preferencial, la cual delimitó la cuenca atmosférica.

Datos meteorológicos en Colombia

La revisión meteorológica y climática realizada para Colombia se basó en dos periodos: el primero entre los años 1981-2010, como línea base climatológica del país y el segundo para el año 2015, teniendo en cuenta que la caracterización de la cuenca puede variar de acuerdo con las condiciones climatológicas presentadas y los fenómenos extremos que pueden influir sobre el patrón de la cuenca. Se seleccionó este año debido a la influencia climática del fenómeno del Niño, y dado este evento se presentaron particularidades respecto al comportamiento atmosférico que afectó seriamente varias regiones de Colombia. Así mismo, en el Informe del Estado Nacional de Calidad del Aire (IDEAM, 2012a) se reportó que el año 2015 presentó altos índices de contaminación atmosférica, y bajo estos hallazgos se examinaron qué elementos se podrían extraer para la planificación del territorio.

Para esto se utilizaron las bases de datos de Reanálisis (Kalnay *et al.*, 1996), disponibles en la página web de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Se seleccionaron las variables de temperatura, magnitud y dirección del viento con niveles de presión de 300, 500, 600, 700 y 925 hectopascales (hPa); la humedad

relativa se obtuvo de la base ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) y los datos de precipitación total de la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (Braun y Kakar, 2008). Éstas son variables de insumo para la elaboración de mapas climatológicos que permitieron determinar el comportamiento de las parcelas de aire dentro de la cuenca al hacer uso del modelo HYSPLIT.

Estos datos se encuentran en superficie de 10 m (0.995 sigma), con resolución de 2.5°, la cual proporciona una representación regional de las variables descritas y que, para este estudio de caso, apoyaron en la comprensión de las condiciones y patrones de gran escala del país que determinan las trayectorias de las parcelas de aire.

Una vez obtenidos los datos, se realizaron los cálculos correspondientes a la climatología según las fechas seleccionadas de las variables, y el respectivo análisis meteorológico y climatológico de cada una en los periodos mencionados.

Datos meteorológicos y de calidad del aire en el Valle de Sogamoso

Se obtuvo información de estaciones meteorológicas para el Valle de Sogamoso, de la base de datos se seleccionaron las variables de viento, temperatura, humedad relativa y precipitación de los periodos 1981-2010 y para el año 2015. Por otra parte, se contó con datos de calidad del aire en las principales ciudades de Duitama, Nobsa, Paipa, Sogamoso y Tunja, seleccionando las estaciones la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de: El Recreo, Nazareth, La Ramada y Hospital administradas por la autoridad ambiental regional Corpoboyacá, así mismo, se requirió conocer información acerca de la estabilidad atmosférica dada en el Valle de Sogamoso a través de estudios de calidad de aire realizados en la zona. La representación gráfica y análisis de estos datos permitieron la caracterización climatológica de la zona de estudio junto a la evidencia de los episodios críticos de contaminación dados durante el periodo del año 2015 para el contaminante PM_{10} .

Modelo y simulaciones

Con el uso del modelo HYSPLIT (Draxler *et al.*, 2003) se exploró el movimiento de las parcelas de aire hacia adelante en la región de Boyacá y específicamente en el Valle de Sogamoso, estableciendo como parámetros de entrada al modelo los siguientes datos: NCEP/NCAR Reanálisis (Kalnay *et al.*, 1996); elevaciones de 750, 1,500 y 2,500 metros sobre el nivel del suelo (m s. n. s.); capa de mezcla, duración de las trayectorias de 16 días para conocer el desplazamiento de las parcelas de aire con origen sinóptico y tiempo de integración de 24 horas con intervalos de 6 horas.

Por otro lado, la técnica estadística de clúster permite simplificar y agrupar la información calculada, basándose en las variaciones de la varianza total entre los

miembros que integran el ensamble del clúster Total Spatial Variance (TSV), como la varianza entre cada uno de los elementos que los componen Spatial Variance (SPVAR). El procedimiento consiste en agrupar pares de trayectorias que provoquen un mínimo incremento de los índices (TSV y SPVAR). El proceso finaliza cuando se forma un único clúster en el que se engloban las trayectorias iniciales y se selecciona el número óptimo de clúster, para representar finalmente las frecuencias de cada trayectoria (Hernández Ceballos, 2012), en el que se establecieron de 5 a 7 grupos de clúster.

Una vez definidos estos parámetros, se fijó la posición espacial (sembrar) de las parcelas de aire, en cada uno de los sitios de interés: grandes centros urbanos (ZU; Tunja y Sogamoso) e industriales (ZI; Ciudadela Industrial y Termopaipa) y a lo largo del corredor industrial del Valle, en una zona de extracción de material de construcción (ZI; Mina San Antonio) y en zonas de actividad agrícola (ZA; Iza), para así conocer los diferentes patrones de circulación de las parcelas de aire en el Valle de Sogamoso. Es importante resaltar, que en el desarrollo de la discusión “Análisis de trayectorias y comportamiento de la contaminación atmosférica” se seleccionaron las figuras de las trayectorias de parcelas de aire más representativas según los resultados arrojados en los meses de febrero y abril por el modelo HYSPLIT.

Conformación metodológica de las cuencas atmosféricas

La metodología propuesta por Iniestra *et al.* (2008a), propone que, para conformar una cuenca atmosférica, se debe calcular la dirección preferencial de las parcelas de aire y las interacciones de la circulación del viento con la superficie, tomando en cuenta criterios meteorológicos y topográficos, así como fuentes de emisión y salud de la población (Davydova, 2004).

Con el uso de las trayectorias hacia adelante cercanas a la superficie de los sitios de interés, en las regiones o centros de emisión de contaminación atmosférica, se debe seleccionar trayectorias por debajo de los 1,000 m de altura (aproximación a la capa límite), en este sentido se establecen círculos concéntricos o polígonos alrededor de las locaciones para facilitar la definición de la estructura preliminar de la cuenca (Iniestra *et al.*, 2008a). Para esto, es necesario identificar la densidad en la cual se concentran las parcelas y se excluyen aquellas trayectorias que no se encuentran dentro del valor umbral (porcentaje) establecido como m , el número de parcelas que terminan en una región y n el total de parcelas soltadas (m/n) (Magaña y Caetano, 2007).

La estructura de la cuenca depende de la condición inicial que sirven como datos de entrada para el modelo HYSPLIT en la simulación de las trayectorias y, por lo tanto, el procedimiento de agrupamiento de formas por medio de la técnica clúster (Iniestra *et al.*, 2008a).

Reconocimiento de los criterios

Este estudio para reconocer los criterios de planificación procedió a analizar los posibles escenarios que podrían permitir la mejora de la calidad del aire, la integración de componentes socio-ecológicos para el ordenamiento del territorio y la conformación de una unidad de gestión regional a partir de implementar la cuenca atmosférica del Valle de Sogamoso.

Resultados

Revisión climatológica de Colombia durante el año 2015

Para comprender las condiciones meteorológicas en Colombia, se procesaron los datos de las variables magnitud y dirección del viento, precipitación, temperatura y humedad relativa, las cuales permitieron determinar la influencia de los diversos fenómenos meteorológicos que ocurrieron en la región durante el año 2015. Mediante mapas climatológicos, una vez analizada la información del año de estudio, se determinaron los periodos cálidos-secos y fríos-húmedos que se presentaron en el país. De acuerdo con la propuesta metodológica desarrollada anteriormente, fue necesario conocer los patrones atmosféricos que sucedieron en el territorio, ya que estos procesos condicionaron el comportamiento de los contaminantes atmosféricos emitidos en la zona de estudio como se desarrolla posteriormente.

El comportamiento registrado de magnitud y dirección del viento estuvo condicionado por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) e influenciado por fenómenos de variabilidad climática. Para el desarrollo de este artículo, se describirá la región Andina, a la cual pertenece la zona de este caso de estudio. La región Andina, está ubicada en el territorio de las calmas ecuatoriales, pero es alcanzada por los vientos alisios del Noreste y Sureste (Guhl, 1954), respecto al 2015 en el mapa climatológico relacionado en el anexo (Figura A.1) permitió corroborar la información otorgada por el IDEAM acerca de los valores de magnitud de viento en la zona de estudio, los cuales se presentaron vientos fuertes con velocidades entre 4-5 m/s en los valles interandinos y de 7-8 m/s como brisas moderadas en zonas de páramo y nevados ubicados en la Cordillera Central (IDEAM, 2016b).

En cuanto a la precipitación, la región Andina posee un régimen bimodal con una gran diversidad pluviométrica (Ruiz y Zea, 2005), con lluvias mensuales relativamente escasas a lo largo de la cordillera Oriental de aproximadamente 100 mm, donde los valores mínimos ocurrieron en los meses de enero y diciembre con precipitaciones de 100-200 mm, mientras que los valores máximos se encontraron en los meses de abril (Figura A.2a). La precipitación durante el año 2015 estuvo influenciada por la ocurrencia del evento ENOS en su fase cálida, la afectación sobre la climatología fue evidente

(Cadena *et al.*, 2015), pues la marcada alteración en los patrones de lluvia se tradujo en el incremento de las lluvias en gran parte del territorio colombiano y fenómenos de sequía en la región Andina (Figura A.2b) durante el mes de febrero.

En relación a la temperatura superficial, la región Andina se caracteriza por presentar pisos térmicos en los que la temperatura varía entre valores inferiores a los 8 °C hasta los 26 °C consistentemente con la altura (Pabón, Eslava y Gómez, 2001), por lo que se distinguen núcleos o franjas con valores relativamente altos o mínimos (Figura A.3), donde la cordillera de los Andes y valles alrededor de ésta estructura presentan estimaciones mínimas de un régimen bimodal en toda su extensión, de acuerdo con esto las épocas cálidas suceden en los primeros meses del año (enero a marzo; Figura A.3a), los meses de transición con valores significativos de una temporada a otra son el mes de abril para la temporada fría y el mes de septiembre para la cálida (Arango, Dorado, Guzmán y Ruiz, 2012).

Sobre la humedad relativa, el comportamiento promedio de la región Andina en la mayor parte del territorio es bimodal con valores entre 75-90% a lo largo del año (Ruiz y Zea, 2005). El año 2015 presentó picos máximos en abril (Figura A.4b), mayo y noviembre y mínimos en febrero (Figura A.4b) y marzo, en la época seca se observan varias anomalías desde el mes de marzo con valores de 60% a diferencia del 70% de humedad relativa propia de la región, en tanto que la época húmeda se registraron valores aproximados al 90% hacia el sur del territorio andino.

Revisión climatológica en el Valle de Sogamoso durante el año 2015

En general el Valle de Sogamoso se rige por las características climatológicas que se presentan en la región Andina donde se encuentra este valle interandino, sin embargo, al ubicarse dentro de una zona montañosa desarrolla ciertas modificaciones climáticas debido a factores de meso y microescala (Arango, 2014).

Respecto a la magnitud y dirección del viento, se obtuvieron las rosas de viento (Figura A.5) donde la dirección procedente es del Sureste y Sur del Valle, por tanto, se presentan vientos de fuertes intensidades con magnitudes de 7 m/s.

La precipitación durante el año 2015 presentó (Figura A.6) una disminución importante del régimen de lluvias siendo menor a los 90 mm mensuales, en donde se evidencia la marcada influencia de El Niño en la región y a procesos atmosféricos llevados a cabo en la media y alta atmósfera que contribuyeron a las modificaciones en los patrones de lluvia de la zona.

En cuanto al comportamiento de la temperatura superficial al ser un valle interandino y zona montañosa, las condiciones como el relieve permiten ubicar al Valle de Sogamoso en pisos térmicos templados, fríos y muy fríos (Corporación Autónoma Regional de Boyaca, 2015) registrando durante el año 2015 valores comprendidos entre los 11 a 17°C (Figura A.6). La humedad relativa durante el año 2015 (Figura A.7) se caracterizó por ser un periodo seco que afectó considerablemente al Valle de Sogamoso.

Comportamiento de los contaminantes atmosféricos en el Valle de Sogamoso

Mediante la revisión meteorológica, climática y el comportamiento de los contaminantes atmosféricos en el Valle de Sogamoso durante el año 2015 se establecieron los escenarios a trabajar con el modelo HYSPLIT, donde las condiciones atmosféricas favorecieron o limitaron la dispersión de contaminantes. De acuerdo con esto, se obtuvo como resultado que el mes de febrero presentó mayor concentración de contaminación por PM_{10} , correspondiente a un periodo seco, siendo éste el escenario 1 y en cuanto al escenario 2, se tuvo en cuenta la disminución significativa de la concentración de PM_{10} , presentándose en un periodo húmedo ocurrido durante el mes de abril (Figura 2).

Es importante resaltar la fuerte relación del aumento y disminución de la concentración de contaminantes con las variables meteorológicas y topográficas del Valle que ameritan investigaciones para comprender su complejidad no es estudiada aún. En el mes de febrero se presentaron valores máximos en todas las estaciones disponibles, relacionado con la magnitud de vientos débiles y disminución de la humedad relativa. Caso contrario para los meses de abril y agosto, cuya disminución de PM_{10} podría generarse por intensas precipitaciones de la época húmeda-lluviosa durante el año 2015.

Análisis de trayectorias y comportamiento de la contaminación atmosférica

En el análisis de trayectorias de parcelas de aire, se obtuvo un total de 1,797 trayectorias diarias representativas de los primeros 16 días de cada mes (febrero y abril), contemplando tres niveles de altura 750-1,500 m s. n. s., en relación al comportamiento de las parcelas cercanas a la superficie y 2,500 m s. n. s. para conocer el comportamiento de las parcelas sobre la capa límite del Valle de Sogamoso, cada trayectoria se calculó con el respectivo porcentaje de ocurrencia en las locaciones seleccionadas en la metodología, permitiendo determinar cuántas trayectorias pasan sobre una región y definir los límites preliminares de la cuenca atmosférica.

Trayectorias para el mes de febrero

Para el mes de febrero se obtuvieron 886 trayectorias diarias, cuya distribución en zonas urbanas indica que los vientos predominantes se dirigen con una mayor frecuencia en dirección noroeste y oeste (Figura 3), presentando un porcentaje de 23-34% respectivamente a las parcelas sembradas en Tunja y Sogamoso (ZU) correspondiente a la altura de 750 m s. n. s., mientras que los emplazamientos en Termopaipa (ZI) e Iza (ZA) presentan trayectorias que oscilan entre 34-35% con dirección predominante hacia el oeste del Valle. En cuanto a la altura de 1,500 m s. n. s., la dirección que

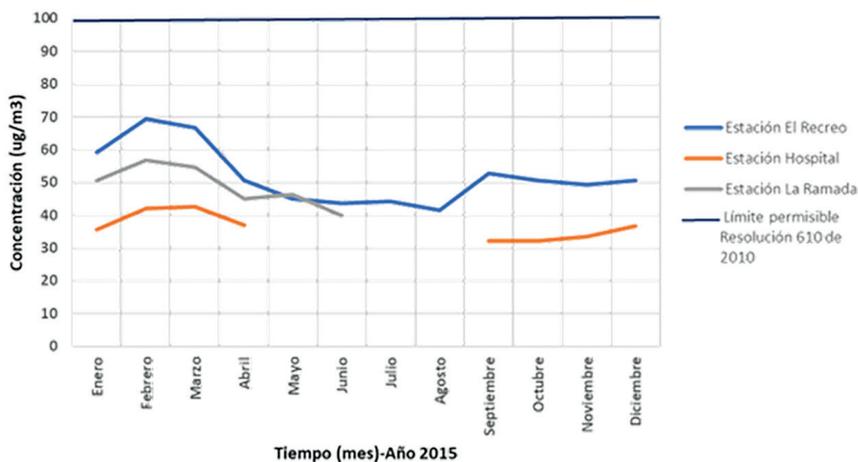


Figura 2. Promedio mensual de PM₁₀ en estaciones de calidad del aire en el municipio de Sogamoso, Valle de Sogamoso, Boyacá, durante el año 2015. Fuente: Datos adaptados de estaciones de calidad del aire SISAIRE.

prevalece es hacia el Noroeste, con frecuencias entre 25-29% y para la altura 2,500 m s. n. s. se encuentra entre 30-39%.

En la Figura 3 se observa que las parcelas de aire ascienden en todos los niveles de altura, cuyo comportamiento se relaciona con la inestabilidad atmosférica del mes de febrero (IDEAM, 2012), siendo esta inestable en el día y ligeramente estable en la noche, por lo que en una atmósfera poco estable las parcelas tenderán a elevarse y con ello a salir del nivel de mil metros, con lo cual la densidad de las parcelas de aire disminuirá en esa dirección (Iniestra *et al.*, 2008a), esto indica que la estabilidad atmosférica es un factor que determina el comportamiento de las parcelas de aire y consecuentemente el patrón de la cuenca atmosférica. Del análisis de resultados obtenidos, se determinó que las parcelas llegan a alcanzar un radio de 400 km en las primeras 18 horas, pasando por territorios de los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, norte de Cundinamarca y sur de Santander y en algunas trayectorias, se observa la recirculación o retorno de éstas al Valle.

Así mismo se encuentra un patrón, pues en los niveles más próximos a la superficie (750-1,500 m s. n. s.) (Figura 3a), las parcelas de aire tienden a quedar atrapadas dentro del radio de los primeros 100 km correspondientes al Valle de Sogamoso determinado por el efecto de la topografía de valle-montaña, pues una vez analizado el perfil de elevación del valle, se encuentra que la altura del terreno está conformado por la zona con mayor elevación de la cordillera de los Andes, denominada macizo de Iguaque, siendo ésta superior a los 2,000 m s. n. m., dando como resultado una influencia en la velocidad de las parcelas y re-direccionando el rumbo de éstas hacia el suroeste. En cuanto al nivel de 2,500 m s. n. s., es evidente la baja incidencia del factor topográfico

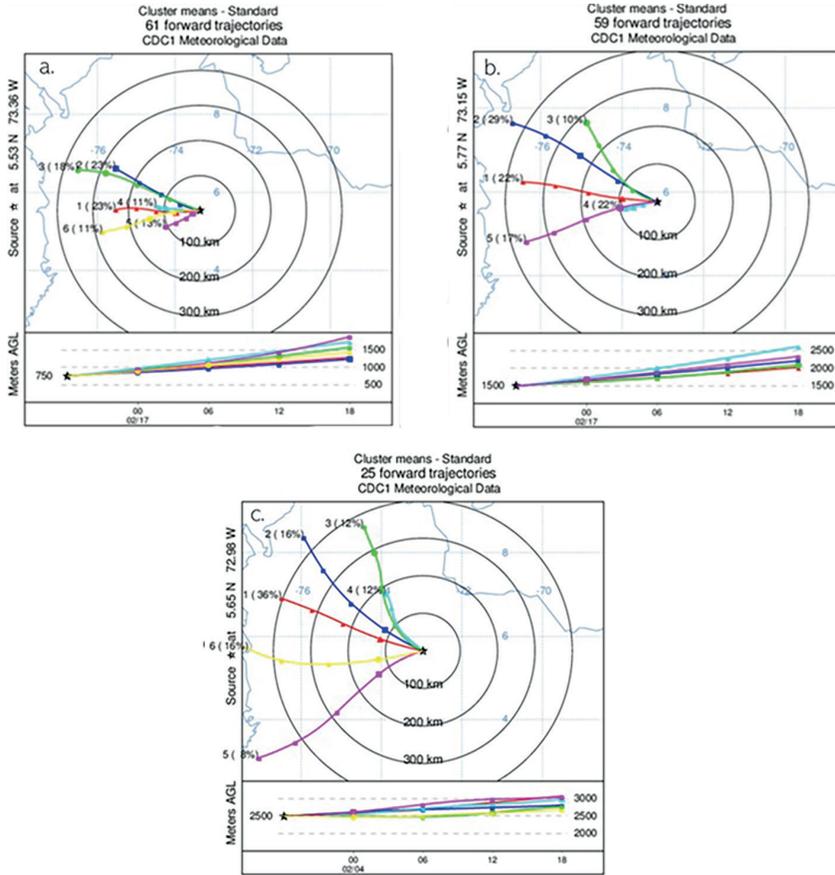


Figura 3. Representación de las trayectorias de parcelas de aire en diferentes niveles para las zonas urbanas, industriales y agrícolas. a) Tunja 750 m s. n. s. (ZI). b) Termopaipa 1,500 m s. n. s. (ZA). c) Iza 2,500 m s. n. s. (ZU). Fuente: Imagen formato arrojado por HYSPLIT.

sobre el desplazamiento de las parcelas de aire, por lo cual son más rápidas en relación con los demás niveles y por esto viajan largas distancias.

De acuerdo con la dinámica de la contaminación atmosférica se podría atribuir el aumento de la concentración de contaminantes durante el mes de febrero al fenómeno de la recirculación de las parcelas de aire, especialmente en los niveles más próximos a la superficie (750-1,500 m s. n. s.) (Figura 3a y 3b). En el nivel de 2,500 m s. n. s. (Figura 3c) se dificulta determinar el comportamiento de los contaminantes a causa de la baja incidencia de la topografía y altas velocidades de las parcelas de aire, por lo tanto, es erróneo atribuir un tipo de fuente específico y un valor de concentración acertado al contaminante en estas alturas (Díaz *et al.*, 2009).

Trayectorias para el mes de abril

Para el mes de abril se obtuvieron 911 trayectorias diarias, cuya distribución en zonas urbanas (ZU) e industriales (ZI) predominaron las trayectorias en dirección Oeste con una frecuencia entre el 20-32%, en zonas agrícolas la dirección suroeste se presenta con una frecuencia del 26% en las trayectorias realizadas para el nivel de 750 m s. n. s., en este caso se observa que frente a lo sucedido en febrero las frecuencias disminuyeron para todos los emplazamientos con excepción de Tunja y aparece una nueva dirección frecuente en la zona agrícola (ZA). En tanto que los niveles de 1,500 m con frecuencias entre 25-38% y 2,500 m con 27-47% mantienen dirección noroeste y oeste (Figura 4) con frecuencias superiores a las estimadas del mes descrito anteriormente.

Durante el mes de abril, las trayectorias continúan el comportamiento ascendente como se observa en la Figura 4a, sin embargo, según la información recolectada para esta investigación, la estabilidad durante el mes es ligeramente estable en el día y neutra en la noche, lo cual implica que las parcelas se transporten cercanas a la superficie, y aunado al lavado atmosférico en correspondencia con la época húmeda-lluviosa, provoca la disminución de concentración de contaminantes atmosféricos en el Valle de Sogamoso (Núñez Crespi, 2002), siendo una posible explicación que las parcelas no queden contenidas dentro del Valle en contraste a lo ocurrido durante el mes de febrero. En este caso, las trayectorias en todos los niveles demuestran ser más rápidas con un desplazamiento mayor a 400 km de radio (Figura 4a, 4b y 4c), alcanzando territorios de los departamentos de Antioquía, sur de Bolívar, Boyacá, Caldas, Chocó, Cundinamarca, Santander y Risaralda.

Conformación de cuencas atmosféricas

De acuerdo con las frecuencias predominantes de las parcelas de aire con origen en el Valle de Sogamoso obtenidas por el modelo HYSPLIT, de todos los emplazamientos obtenidos se seleccionaron aquellas que alcanzaron una altura menor a los 1500 m, ya que se encuentran próximas a la capa límite siguiendo los lineamientos descritos en la propuesta metodológica, consecuentemente para establecer preliminarmente los límites de la cuenca atmosférica, se determinó un umbral mayor al 15%, obtenido de la cantidad de trayectorias frecuentes que finalizan en una región sobre el total de parcelas soltadas en los meses de febrero y abril del año 2015, lo cual permitió construir un patrón de cuenca atmosférica (Figura 5).

A partir del patrón de cuenca atmosférica, se realizó sobreposición de mapas para así determinar que los departamentos de Antioquia, Caldas, Chocó y Risaralda, son territorios en los cuales las trayectorias con mayor frecuencia finalizan su recorrido, sin embargo, se estableció un valor mínimo de trayectorias frecuentes que atraviesan

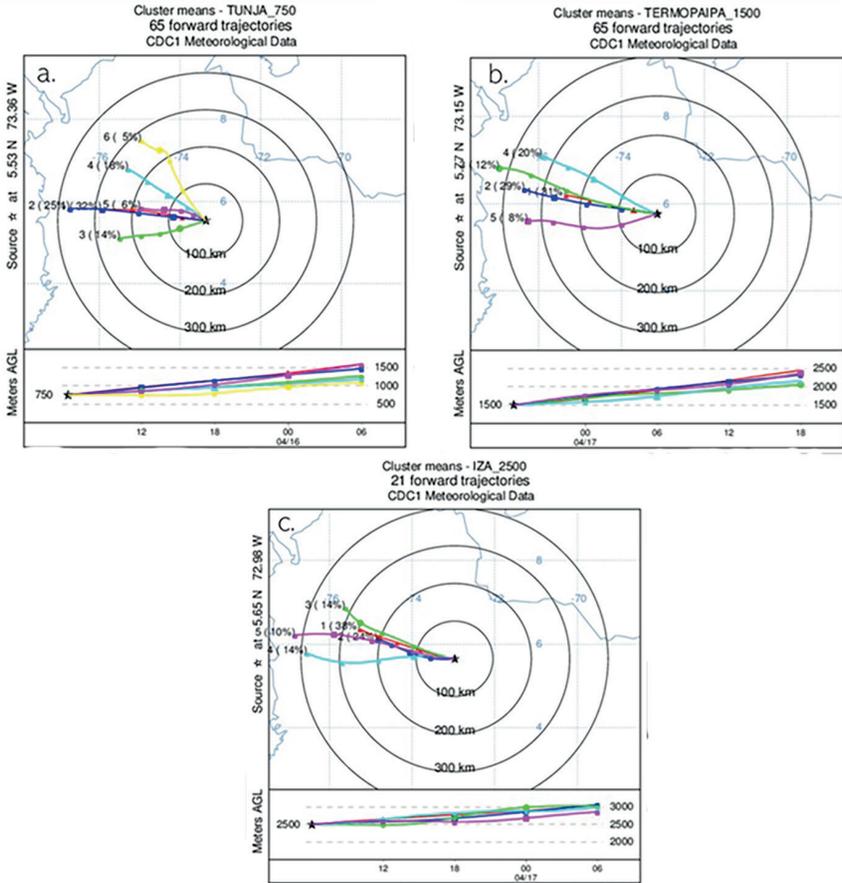


Figura 4. Representación de las trayectorias de parcelas de aire en diferentes niveles para las zonas urbanas, industriales y agrícolas. a) Tunja 750 m s. n. s. (ZI). b) Termopaipa 1,500 m s. n. s. (ZA). c) Iza 2,500 m s. n. s. (ZU). Fuente: Imagen formato arrojado por HYSPLIT.

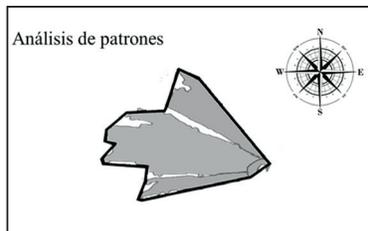


Figura 5. Patrón de cuenca atmosférica, seleccionando la concentración de trayectorias por debajo de los 1,500 m altura media a la capa límite. Fuente: Elaboración de los autores a partir del análisis de clúster.

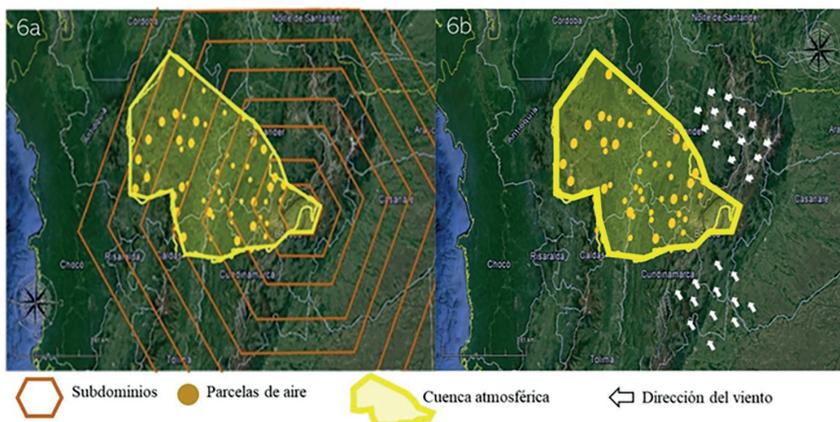


Figura 6. a) Límite probable de la cuenca atmosférica del Valle de Sogamoso y subdominios. Zona del viento predominante en los meses de febrero y abril. b) Influencia de los vientos Alisios en la cuenca atmosférica del Valle de Sogamoso. Fuente: Elaboración de los autores partir de imágenes de *Google Earth*.

por una de las caras del polígono como posible estructura de la cuenca, lo cual permite conocer en qué dirección se ha de ampliar la estructura de ésta.

Para la construcción de los límites probables de la cuenca atmosférica se generaron polígonos y círculos concéntricos cuya longitud del radio determina el alcance de las corrientes de aire, definiendo las áreas de subdominio de la cuenca, considerando aspectos climáticos similares de los territorios que aborda la cuenca y la topografía, se establecieron los límites y área de la cuenca atmosférica del Valle de Sogamoso (Figura 6a).

La cuenca se encuentra conformada preliminarmente por territorios de los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Cundinamarca y Santander, con un área aproximada de 49,700 km², considerando los límites de la Cordillera de los Cobardes en Santander, la divisoria de aguas de la Cordillera Occidental en contacto con la región Pacífica, al suroeste con el Cañón del Cauca y al sur con el Valle del Magdalena.

La cuenca tiene menor influencia de los vientos Alisios del Noreste y sureste, siendo predominantes los originados por las brisas valle-montaña las que se desarrollan en la zona (Figura 6.b). A partir de este fenómeno, la contaminación emitida por el Valle posee una conexión ambiental con el Valle de Aburrá en Antioquia, ya que la mayoría de las parcelas de aire se concentran en esta última zona, lo cual podría explicar episodios de contaminación y deterioro de calidad del aire que afecta recientemente a la población de Medellín. De esta forma se evidencia que la contaminación emitida en el Valle de Sogamoso y apoyado de las condiciones meteorológicas y topográficas de la región, podrían transportarse, dispersarse y concentrarse en otras zonas, afectando severamente la calidad ambiental de los lugares que se encuentran en el radio del Valle.

Discusión

Criterios para la planificación y el ordenamiento territorial a partir del enfoque de cuencas atmosféricas

La evolución de los procesos territoriales ha conllevado a la integración de diferentes enfoques que intentan comprender de manera conjunta las interacciones entre las dimensiones ecológica, económica y social, haciendo uso de diferentes instrumentos de planificación, no obstante, la complejidad de tratar con estas dimensiones ha llevado al desarrollo desigual de éstas, promoviendo el desequilibrio o desarticulación de las relaciones locales, regionales y nacionales (Aguiló, 2012; Rengifo, 2012).

Los criterios a partir de las cuencas atmosféricas buscan establecer una nueva variable ambiental como eje principal para la toma de decisiones, sobre los usos del suelo considerando crecimientos urbanísticos, nuevos asentamientos industriales, infraestructuras para la generación y distribución energética, áreas de producción agropecuaria y otras de carácter regional o local encaminada al uso sostenible del territorio que garantice el bienestar social de la población. Las cuencas atmosféricas basadas en la dinámica atmosférica y en variables ecológicas (tipos de ecosistemas, Estructura Ecológica Principal y áreas protegidas), topográficas y meteorológicas son un nuevo esquema para la gestión regional y como herramienta de planificación territorial. Por lo tanto, proponer la implementación de la cuenca en el Valle de Sogamoso como herramienta que contribuye a la planificación y gestión territorial ambiental aporta los siguientes criterios.

Topografía y meteorología

Los resultados obtenidos en la sección de “Análisis de trayectorias de parcelas de aire” demostraron cómo la topografía define la dinámica atmosférica del Valle, siendo el Macizo de Iguaque, un sistema montañoso de aproximadamente de 3,800 m s. n. m., el que determina el tipo de viento local, junto a las demás variables meteorológicas y a su vez podría estar influyendo sobre el comportamiento de los contaminantes en la época seca y húmeda del año. Considerando éstos resultados, se comprende que la presencia de asentamientos industriales como las siderúrgicas, cementeras, termoeléctricas, industrias artesanales y de extracción minera, no deberían situarse dentro de un valle, debido a las condiciones de estabilidad atmosférica que promueven la concentración de contaminantes atmosféricos dentro de la zona, por lo tanto, la ubicación estratégica para el desarrollo de estas actividades deberían contemplarse en zonas donde las barreras orográficas no sean un impedimento para la dispersión de la contaminación o bien sea teniendo en cuenta patrones regionales de la circulación de la atmósfera.

No obstante, ante el evidente desarrollo industrial presente en el Valle de Sogamoso, el uso de la cuenca atmosférica permitiría establecer las horas críticas en las que existe mayor posibilidad de presentar episodios de contaminación debido al monitoreo constante de la atmósfera, cuyos procesos industriales sean llevados a cabo en concordancia a la distribución temporal, donde las condiciones atmosféricas favorezcan la difusión de los contaminantes emitidos.

Otro aspecto importante dentro de la topografía y meteorología, respecto a la dinámica atmosférica, es la agrupación de parcelas de aire prevalecientes hacia una dirección, lo cual indicaría la probable zonificación de áreas destinadas a procesos urbanísticos e industriales que se contemplan en los planes de ordenamiento territorial. El beneficio de tener en cuenta este flujo de aire, es evitar afectaciones a la población inmediata por los contaminantes emitidos y que se planteen escenarios de futuros proyectos industriales con base en las condiciones meteorológicas a lo largo del año.

Cuencas atmosféricas como unidad de gestión

Las metodologías para la definición de unidades de gestión han implementado nuevos esquemas de intervención territorial, en los cuales involucran la dimensión ambiental como marco central para la asociación territorial. En Colombia, se han desarrollado ejercicios de unidades de gestión basados en cuencas hidrográficas, zonificación ecológica y en la EEP, dando como resultado la construcción de un nuevo modelo que contribuya al manejo sostenible de la región y conservación del ambiente (Villegas Rodríguez, 2014).

La metodología de cuencas atmosféricas permite la definición de una nueva unidad de gestión regional, pues involucra diferentes unidades administrativas que pueden ser influenciadas o afectadas por emisiones de origen urbano, suburbano, agrícola o por fuentes naturales que llegan a transformar la calidad del aire de una región. Por lo tanto, la delimitación de la cuenca parte del uso de trayectorias de parcelas de aire locales que se mueven alrededor del centro de emisión hacia otras regiones en las cuales posee influencia, siendo una asociación transfronteriza de regiones.

La unidad de gestión formulada con las cuencas atmosféricas, implica generar decisiones unitarias en la planificación para la protección de la salud pública, mejora de la calidad del aire, formulación de agendas ambientales consolidadas entre varias unidades administrativas, diseño e implementación de políticas públicas para prevención de riesgos ambientales en materia de calidad del aire basados en la producción de conocimiento de la atmósfera e involucrando la participación de los diferentes sectores, gremios y sociedad civil. Cabe señalar que el concepto de calidad del aire no ha sido asociado con los procesos de planificación territorial, siendo ésta una oportunidad para la integración de un nuevo enfoque en el ordenamiento del territorio.

Apoyo a los sistemas de monitoreo de calidad del aire

La dispersión y transporte de los contaminantes se encuentra determinado por el patrón de circulación atmosférica e influenciada por elementos topográficos característicos de la región, las cuencas atmosféricas en países como México, Estados Unidos y Canadá representan un instrumento para el monitoreo de la calidad del aire implicando compromisos transfronterizos entre países (EPA, 2005; Magaña *et al.*, 2007), permitiendo la toma de decisiones de más de una división política.

Implementar la cuenca atmosférica del Valle de Sogamoso, permitiría apoyar los sistemas de monitoreo de calidad del aire, reforzando la ubicación de las estaciones de medición en concordancia con el paso de las trayectorias de las parcelas por el Valle y a la altura promedio que alcanzan las parcelas que transporten los contaminantes. Adicionalmente, la aplicación metodológica de la cuenca atmosférica en esta zona contemplaría todo tipo de fuentes de emisión y contaminantes al mismo tiempo, sin embargo, en este caso se requiere producir información científica que comprenda cómo se comportan los contaminantes de acuerdo con factores meteorológicos, termodinámicos y climáticos de la zona en conjunto con la modelación de la calidad del aire.

Por último, al conocer detalladamente la dinámica atmosférica y delimitar la cuenca de una zona con base a diferentes criterios, se modificarían estandarizaciones sobre la altura de las chimeneas en fuentes de emisión puntuales, ya que al conocerse el comportamiento de las parcelas de aire a diferentes niveles junto al movimiento vertical de éstas, se podría generar un estimado de la altura de la chimenea, favoreciendo así a la dispersión de los contaminantes y mejorando la calidad del aire a largo plazo.

Conclusiones

Las variables meteorológicas en el Valle de Sogamoso se encuentran condicionadas por efectos locales como consecuencia de la topografía de valle-montaña que presenta la zona. Los factores meteorológicos, de estabilidad atmosférica y topografía determinan el comportamiento de las parcelas de aire y con ello de los contaminantes emitidos por las diferentes actividades industriales y fuentes móviles que se localizan al interior del Valle, siendo la época seca la que favorece la dispersión de contaminantes atmosféricos y la húmeda evidencia una notable disminución de éstos.

A partir del modelo HYSPLIT, se calcularon las trayectorias de parcelas de aire para los meses de febrero y abril, escogidos de acuerdo a las épocas secas y húmedas del año, relacionados a episodios de contaminación atmosférica, esto reveló que durante el mes de febrero algunas parcelas quedan contenidas al interior del Valle, lo cual explicaría los valores máximos de concentración de PM_{10} registrados en esta zona, mientras que para el mes de abril, las trayectorias salen del Valle de Sogamoso, donde los

flujos de aire se dirigen en dirección Oeste y Noroeste, hasta los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Cundinamarca y Santander.

Esta investigación presentó una aproximación a la cuenca atmosférica del Valle de Sogamoso, por medio del análisis de trayectorias de parcelas de aire, delimitada principalmente por factores meteorológicos y topográficos de la zona, evidenciando la influencia del paso de las parcelas provenientes del Valle sobre otros territorios a escala regional, generando posibles eventos de contaminación atmosférica e influenciando episodios de contaminación del aire del Valle de Aburrá.

La conformación de la cuenca atmosférica, generó criterios que aportan nuevos conceptos y herramientas en la toma de decisiones para la planificación y gestión ambiental del territorio, los cuales fueron incluir la meteorología y topografía como elemento para el ordenamiento territorial junto al conocimiento detallado de la dinámica atmosférica, implementar las cuencas atmosféricas como unidades de gestión regional para la toma de decisiones unitarias que mejoren la calidad de vida en la región y como apoyo a los sistemas de monitoreo de calidad del aire.

Las cuencas atmosféricas basadas en la dinámica atmosférica y en variables ecológicas, topográficas y meteorológicas son un nuevo esquema para la gestión regional, como herramienta de planificación territorial y para el mejoramiento de la calidad del aire.

Se identificaron futuras líneas de investigación relacionadas al conocimiento detallado de la atmósfera, donde la información para la generación de cuencas atmosféricas considere el flujo de aire anual en condiciones meteorológicas normales y en eventos de variabilidad climática, ya que esta cuenca fue formulada con influencia del fenómeno de El Niño. Así mismo, podrían desarrollarse estudios de trayectorias de parcelas de aire húmedo relacionado al potencial hidrológico de una zona y la afectación de éste con la contaminación atmosférica, adicionalmente conocer las retro-trayectorias de las parcelas y el aporte de contaminación desde otras zonas.

Bibliografía

- AGUILÓ, Irene. (2012). *Integración de la calidad del aire en la planificación física*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid.
- ARANGO, Cristian; DORADO, Jennifer; GUZMÁN, Diana; y RUIZ, José. (2012). *Cambio climático más probable para Colombia a lo largo del Siglo XXI respecto al clima presente*. Bogotá: IDEAM, Subdirección de Meteorología.
- ARANGO, Cristian. (2014). *Identificación de patrones de circulación atmosférica en el Valle de Sogamoso y estimación de su impacto en la calidad del aire mediante un modelo meteorológico avanzado y análisis de trayectorias*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- BRAUN, Scott; y KAKAR, Ramesh. (2008). *Tropical Rainfall Measuring Mission* (en línea). <https://trmm.gsfc.nasa.gov/>

- CADENA, Martha; RODRÍGUEZ, Leidy; y VEGA, Araminta. (2015). *Anuario Climatológico 2015*.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ (CORPOBOYACÁ). (2015). *Atlas Geográfico y Ambiental Corpoboyacá*. Tunja: Corpoboyacá.
- DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIBERGER, L.; HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; HÖLM, E. V.; ISAKSEN, L.; KALLBERG, P.; KÖHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCRETTE, J. J.; PARK, B. K.; PEUBEY, C.; DE ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J. N.; y VITART, F. (2011). "The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. doi.org/10.1002/qj.828
- DÍAZ, Luis; ETCHARREN, Pablo; PINAUD, Jean Paul; PACHECO, Boris; CARIMAN, Eddio; y VARELA, Cristian. (2009). *Estudio Determinación de la Zona Saturada por Material Particulado Respirable de Ozono*. Temuco: Universidad Católica de Temuco.
- DRAXLER, Roland; y ROLPH, Glenn. (2003). *HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)*.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (1982). *APTI Course SI409: Basic Air Pollution Meteorology Student Guidebook*. Washington: EPA.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (2005). *Border Air Quality*. Canadá: Her Majesty the Queen in Right of Canada.
- GUHL, Ernesto. (1954). *Visión socio-geográfica de Colombia (Algunos aspectos)*. Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología (ICAN).
- HERNÁNDEZ CEBALLOS, Miguel Ángel. (2012). *Caracterización meteorológica y modelización de Andalucía occidental*. Huelva: Universidad de Huelva.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). (2012). *Estado de la calidad del aire en Colombia 2007-2012*. Bogotá: Comité de Comunicaciones y Publicaciones IDEAM.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). (2016a). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011-2015*. Bogotá: IDEAM.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). (2016b). *Atlas Interactivo Climatológico de Colombia* (en línea). <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JEENE, Roy; y JOSEPH, Dennis. (1996). "The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3) 437-471. doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- MAGAÑA, Víctor; y CAETANO, Ernesto. (2007). *Identificación de Cuencas Atmosféricas en México*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología.

- MÁRQUEZ, Germán; y VALENZUELA, Elizabeth. (2008). “Estructura Ecológica y Ordenamiento Territorial Ambiental: Aproximación Conceptual y Metodológica a partir del Proceso de Ordenación de Cuencas”. *Gestión y Ambiente*, 11(2), 137-148.
- NÚÑEZ CRESPI, Sylvia. (2002). *Altura de la capa de mezcla: Caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna*. (Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid). Recuperada de <https://eprints.ucm.es/4622/>
- PABÓN, José; ESLAVA, Jesús; y GÓMEZ, Raúl. (2001). “Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia”. *Meteteorología Colombiana*, (4), 47-59.
- RENGIFO, Julián. (2012). “Evolución de la Planificación Regional en Colombia. ‘Tendencias y Perspectivas del Desarrollo’”. En *XII Coloquio Internacional de Geocrítica*. Universitat de Barcelona.
- RODRÍGUEZ, Adriana del Pilar. (2002). *Perfil del Manejo Ambiental de la Ciudadela Industrial de Duitama-Boyacá*. Bogotá: Universidad de la Sabana.
- RUIZ, José; y ZEA, Jorge. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia. En Aspectos Generales - Parte I*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- STEIN, A. F.; DRAXLER, R. R.; ROLPH, G. D.; STUNDER, B. J. B.; COHEN, M. D.; y NGAN, F. (2015). “NOAA’s HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12) 2059-2078. doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1
- URIBE BARÓN, Leidy Johana; y SUÁREZ ARAQUE, Natalia. (2009). *Evaluación de la calidad del aire del Valle de Sogamoso, respecto a material particulado menor a 10 micras (MP10), aplicando el modelo de dispersión AERMOD como herramienta de planificación*. (Trabajo de grado, Universidad de La Salle). Recuperado de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/63/
- VILLEGAS RODRÍGUEZ, Ernesto. (2014). “Las unidades de planificación y gestión territorial, como directriz para la zonificación urbana”. *El Agora USB. Revista de Ciencias Sociales*, 14(2), 551-581. doi.org/10.21500/16578031.67

Anexos

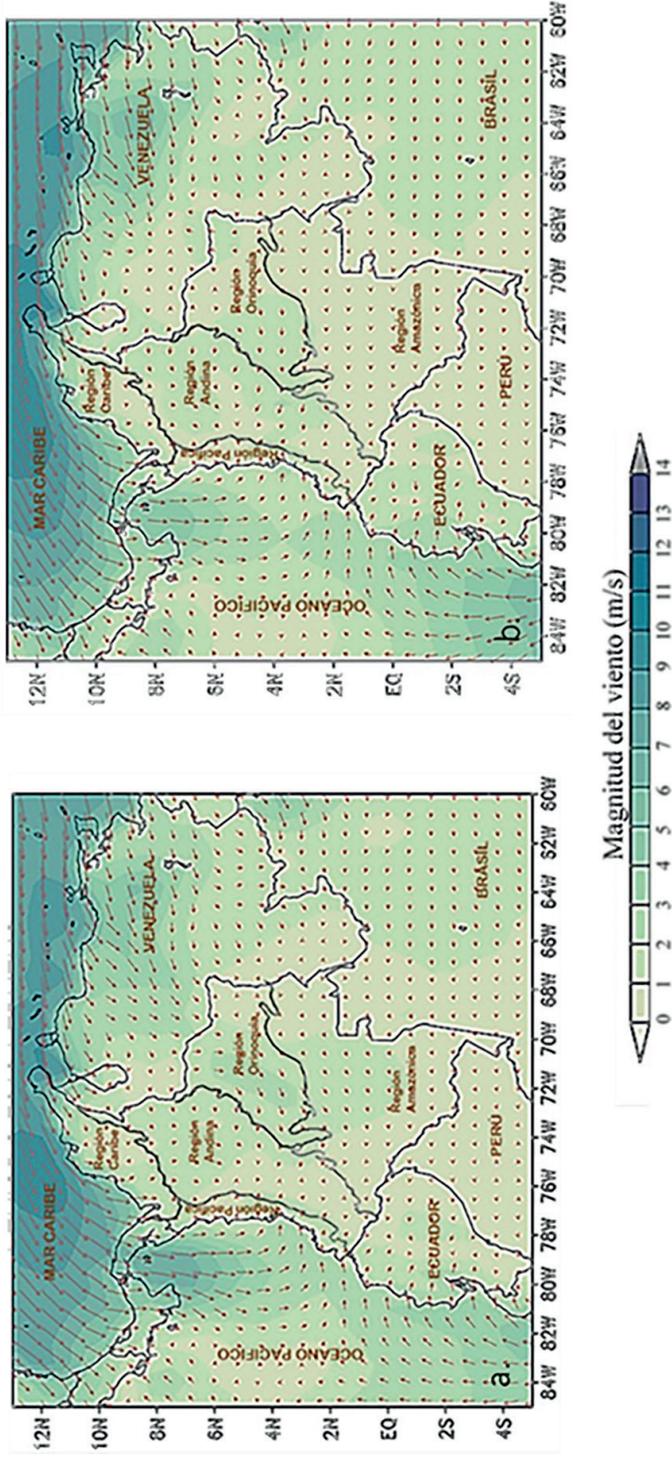


Figura A.1. a) Magnitud y dirección del viento para el mes de febrero periodo 2015. b) Magnitud y dirección del viento para el mes de abril periodo 2015. Fuente: Elaboración de los autores a partir de ficheros de datos de la NOAA

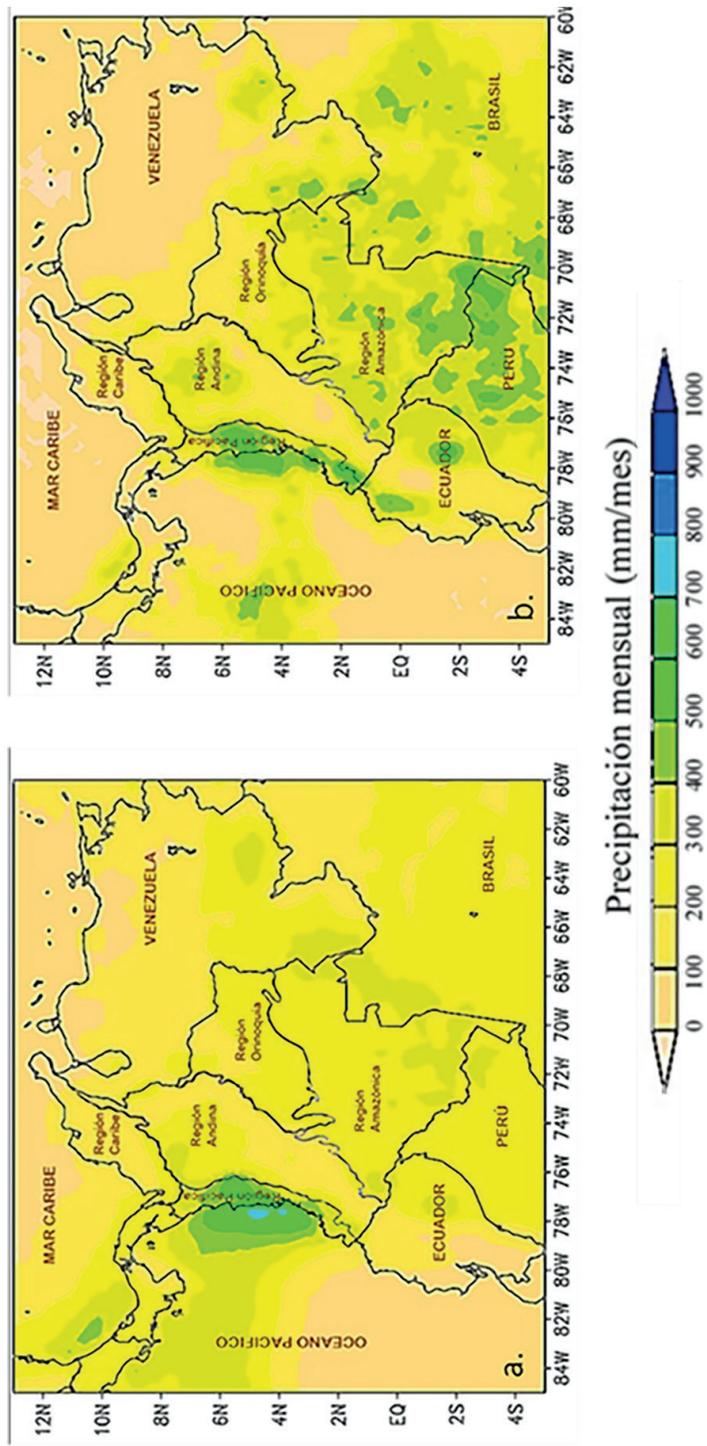


Figura A.2. a) Precipitación en el mes de febrero periodo 2015, b) Precipitación en el mes de abril periodo 2015. Fuente: Elaboración de los autores a partir de ficheros de datos de TRMM.

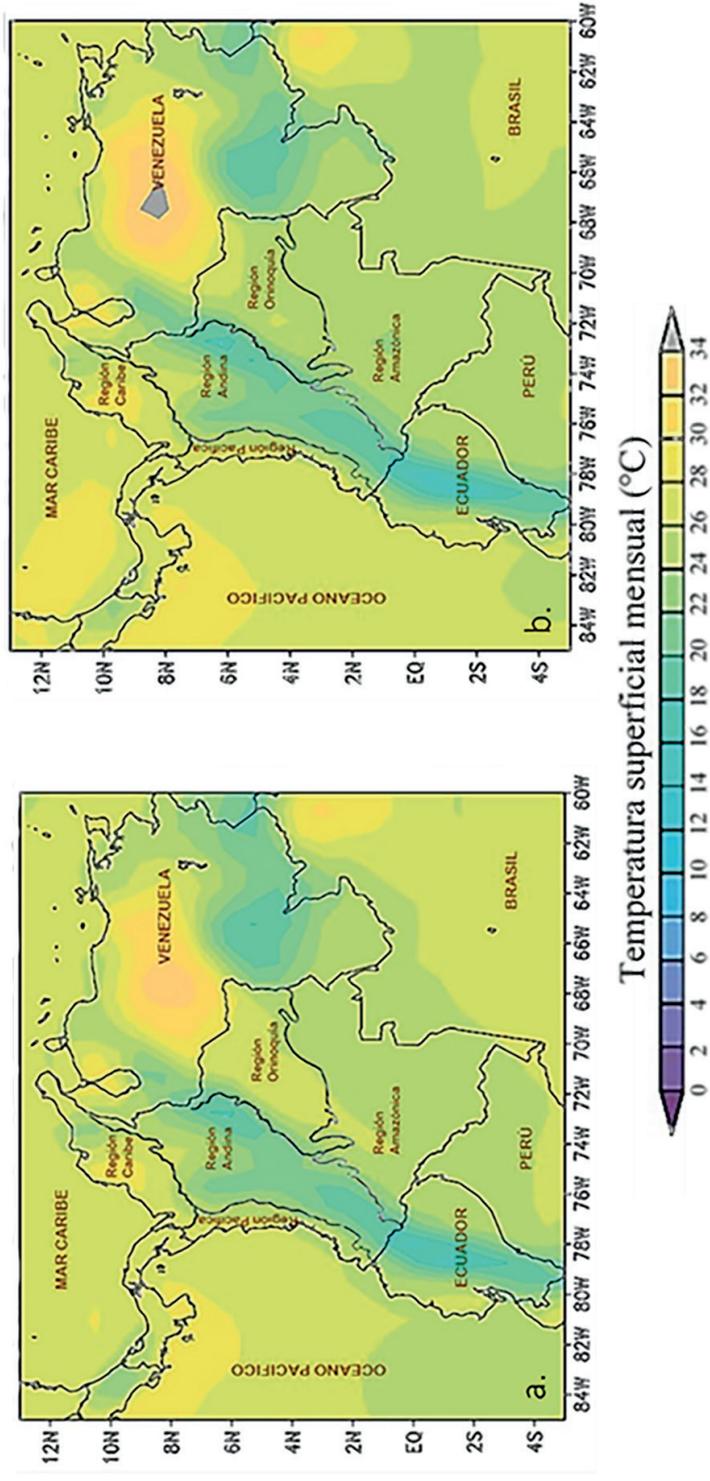


Figura A.3. a) Temperatura superficial en el mes de febrero periodo 2015. b) Temperatura superficial en el mes de abril periodo 2015. Fuente: Elaboración de los autores a partir de ficheros de datos de NOAA.

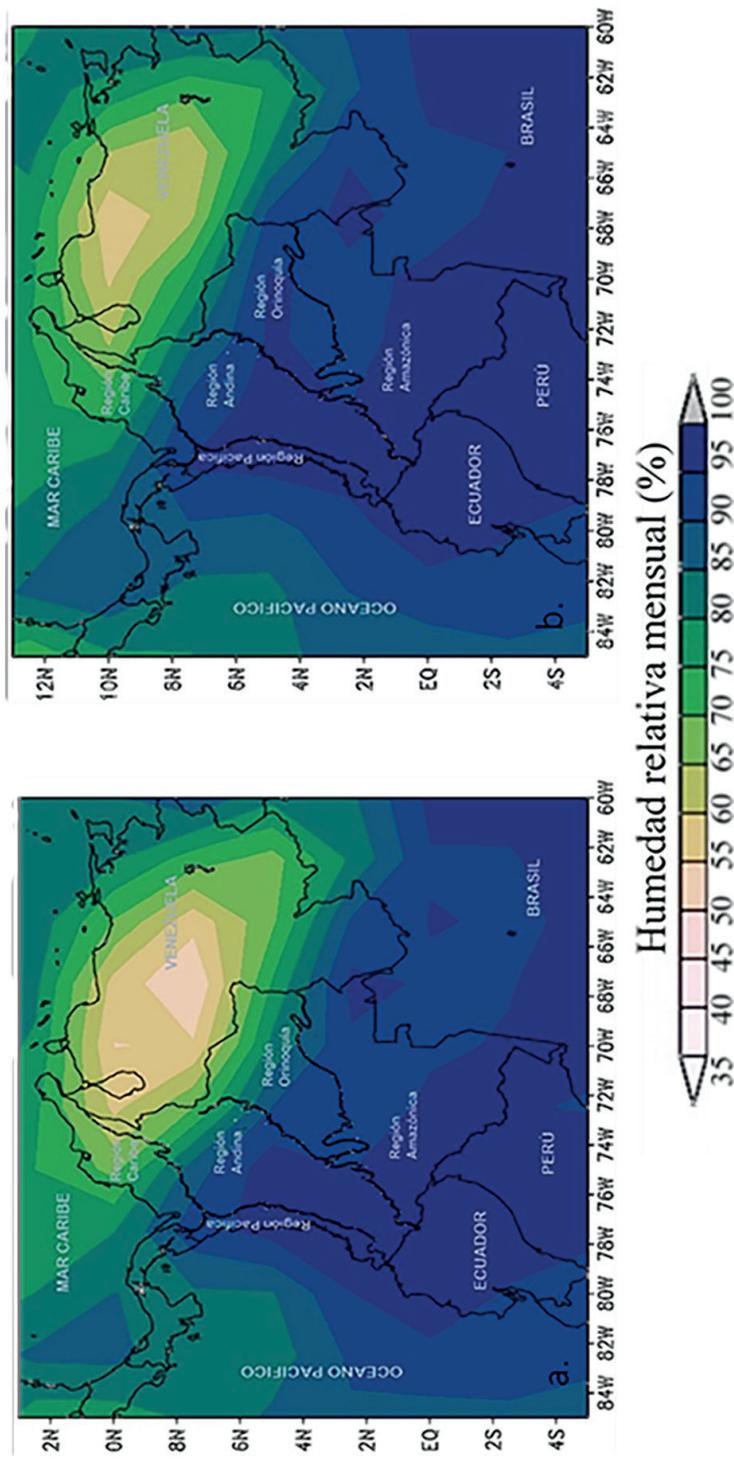


Figura A.4. a) Humedad relativa en el mes de febrero periodo 2015. b) Humedad relativa en el mes de abril periodo 2015.

Fuente: Elaboración de los autores a partir de ficheros de datos de ERA-Interim.

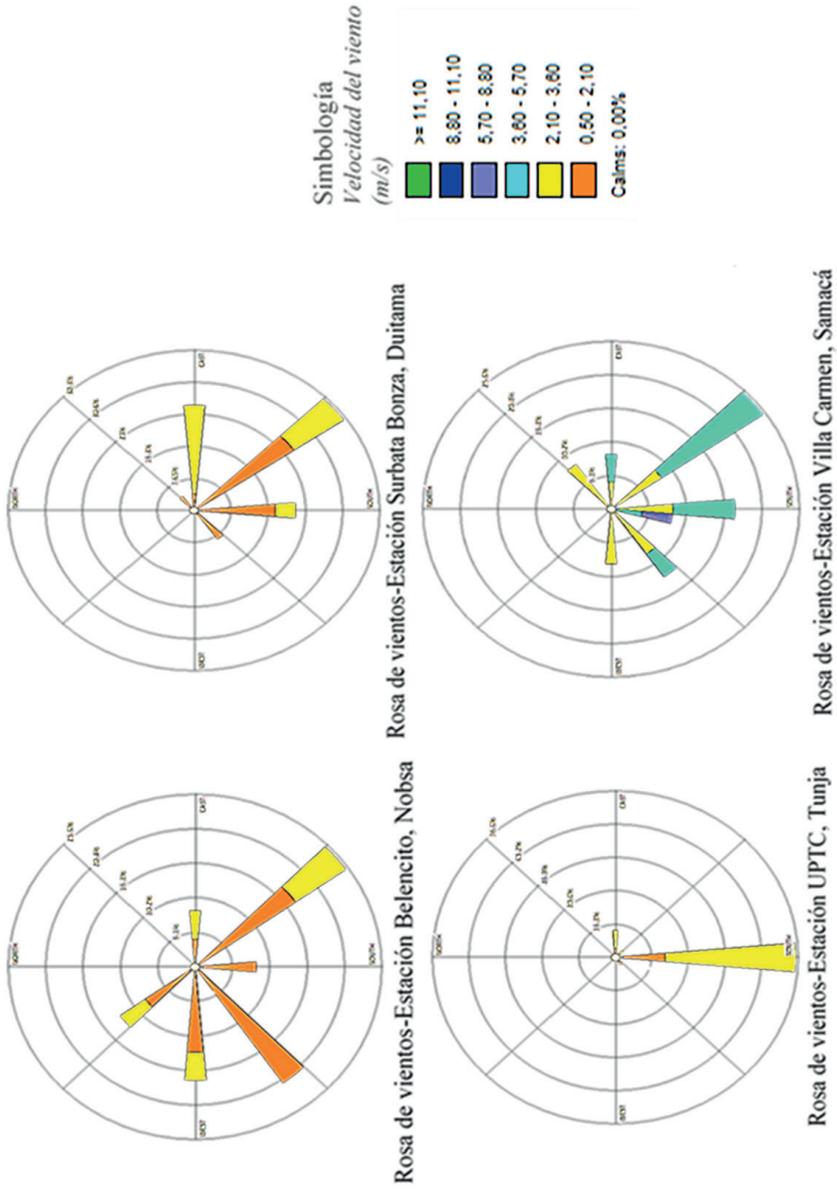


Figura 4.5. Rosas de vientos de los municipios de Nobsa, Duitama, Tunja y Samacá en el Valle de Sogamoso. Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos meteorológicos del IDEAM año 2015.

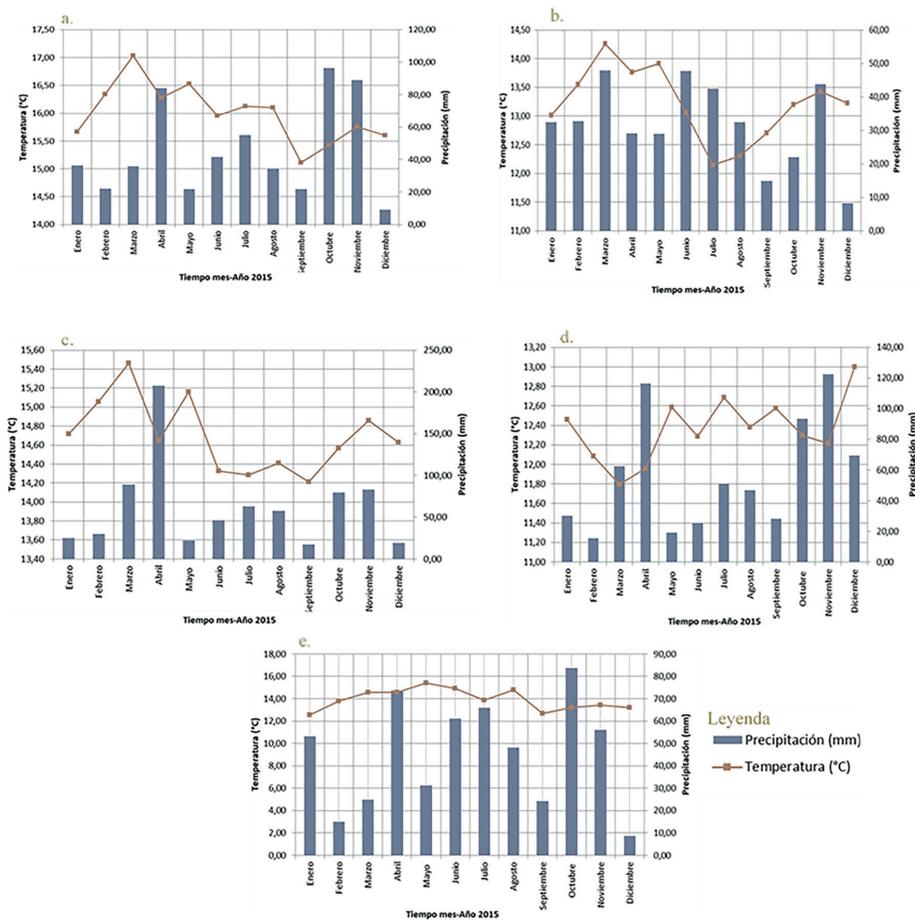


Figura A.6. Climogramas estaciones ubicadas en el Valle de Sogamoso: a) Belencito-Nobsa. b) UPTC-Tunja. c) Tanguavita-Paipa. d) La Rusia-Duitama. e) Apto A. Lleras C-Sogamoso. Fuente: Elaboración de los autores a partir de estaciones meteorológicas del IDEAM año 2015.

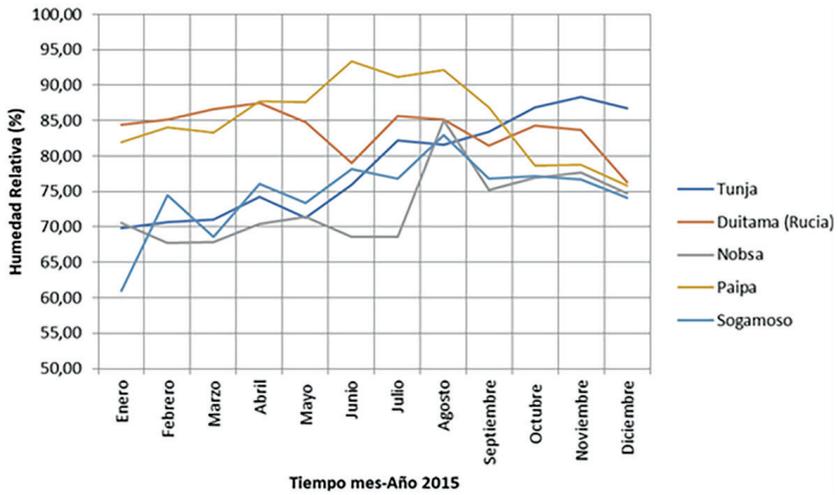


Figura A.7. Promedio de humedad relativa a estaciones ubicadas en las principales ciudades y municipios del Valle de Sogamoso. Fuente: Elaboración de los autores a partir de estaciones meteorológicas del IDEAM año 2015.