

# Modelación de fuentes de emisión en Aermod, con información meteorológica de Bogotá

## Modelling emission sources in Aermod with meteorological information from Bogotá

GUSTAVO ADOLFO BURBANO SEFAIR<sup>1</sup> - HENRY TORRES POSADA<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional.

gustavo.burbano-s@mail.escuelaing.edu.co - henrytorrespo@yahoo.com

Recibido: 25/01/2019 Aceptado: 12/02/2019

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

La ejecución de modelos de calidad de aire en Aermod requiere el uso de datos de horarios de temperatura, humedad relativa, nubosidad, precipitación, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento de manera horaria. Sin embargo, las estaciones meteorológicas en Colombia, administradas por el Ideam<sup>1</sup> a escala nacional y otras entidades a escala local, no poseen suficientes datos, por lo cual hay que utilizar información proveniente de modelos de pronóstico de clima para obtener 8760 horas de datos anuales requeridos para cada variable climática necesaria para correr el modelo. Por lo anterior, se hizo una comparación de dos fuentes de datos: los obtenidos de una estación meteorológica colombiana, utilizando interpolación lineal para completar los datos necesarios, y los datos obtenidos del modelo WRF<sup>2</sup>. Para cada fuente de datos se efectuó una modelación hipotética en la ciudad de Bogotá.

**Palabras claves:** Aermod, calidad de aire, meteorología, WRF.

### Abstract

For the execution of air quality models in Aermod, it is necessary to use hourly data of temperature, relative humidity, cloud cover, precipitation, atmospheric pressure, wind speed and wind direction. However, weather stations in Colombia, which are managed by Ideam and other entities at local or regional level, have insufficient data; therefore, it is necessary to use climate models to obtain 8760 hours of data required for one year of each variable necessary to run the model. Hence, a comparison is made of the two data sources, one as a result of a Colombian meteorological station using linear interpolation to complete the necessary data and the other obtained from the WRF model, for each data source a hypothetical modeling was performed in Bogota.

**Keywords:** Aermod, air quality, meteorology, WRF.

1. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).  
2. Weather Reserch and Forecasting model.

## INTRODUCCIÓN

Una de las áreas de interés de la ingeniería ambiental en los estudios de calidad de aire se basa en el conocimiento del transporte de los contaminantes emitidos a la atmósfera por diversas fuentes, ya sea de origen natural o antrópico. La normativa ambiental en este sentido es cada vez más estricta y exige la aplicación de modelos matemáticos para evaluar el impacto de las emisiones atmosféricas, establecer los mecanismos de prevención y control tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles y dar cumplimiento a los estándares de emisión y descarga de los contaminantes.

Sin embargo, la información que requiere el sistema de modelación AERMOD es en materia de horas, lo que indica que son necesarios como mínimo 8760 datos de información para un año, de manera superficial, y para el perfil meteorológico se necesitan mínimo 365 datos (al menos el sondeo de una hora del día).

## METODOLOGÍA

Se revisó la información recolectada en las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, identificando el tipo de estación y la frecuencia con la cual se toman los datos. Se consultaron guías existentes para la construcción de los archivos meteorológicos de entrada para el *software* AERMOD, con el fin de identificar los requisitos mínimos de información para correr el modelo, y establecer una metodología sencilla para la construcción de un archivo meteorológico, definiendo las variables meteorológicas mínimas requeridas a partir de datos de estaciones del IDEAM.

Con el ánimo de validar la información y alcanzar el objeto de este proyecto, se efectuó una modelación en la ciudad de Bogotá utilizando un caso hipotético con archivos meteorológicos construidos con la información de las estaciones del IDEAM y la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) más cercanas al aeropuerto El Dorado y la misma modelación, empleando información del modelo predictivo WRF para el año 2015. Todos los resultados obtenidos se compararon para determinar las principales diferencias presentes en la dispersión de los contaminantes en un área específica, tanto en las concentraciones obtenidas como en la distribución espacial de los conos de dispersión.

## RESULTADOS

### Construcción de los archivos meteorológicos de entrada para su uso en AERMOD

Con base en la información meteorológica requerida para un proyecto de modelación, se seleccionó la estación 21205790 Apto. El Dorado (aeropuerto El Dorado) para la obtención de información horaria administrada por el IDEAM y la estación meteorológica Las Ferias, perteneciente a la red de monitoreo de calidad de aire de la ciudad de Bogotá. Con base en la información de esas dos estaciones se efectuó el proceso de consecución de datos y modelación de un caso hipotético.

Se obtuvieron datos de precipitación, evaporación, nubosidad, temperatura, velocidad y dirección del viento y rosa de vientos para el año 2015. Sin embargo, se pudo observar que la información suministrada no corresponde a todas las horas del día, sino que se registran lecturas en horas específicas.

Es así como para la temperatura se hacen tres lecturas diarias, a las 7, 13 y 19 horas, razón por la cual se decidió efectuar la interpolación de los valores de temperatura entre las 7 y 13 h, entre las 13 y 19 h y entre las 19 y 7 h del día siguiente. La interpolación se propone teniendo en cuenta que entre las 7 y las 13 h la temperatura va aumentando hasta alcanzar su máximo en la hora 13, y entre las 13 y las 19, y las 19 y las 7 del día siguiente, va disminuyendo. Para las demás variables, humedad relativa, punto de rocío y humedad, que también se reportan a las mismas horas, se decidió efectuar el mismo procedimiento, para no llenar el archivo de datos faltantes o desconocidos. De esta manera, se obtienen los 8760 datos requeridos para cada variable.

La presión atmosférica se tomó en forma constante, pues se presume que no hay mayor variación con la altura sobre el nivel del mar (742,71 mb).

En cuanto a la dirección y velocidad del viento, como solo se pudo conseguir información diaria, se decidió obtener información de la estación meteorológica Las Ferias, perteneciente a la red de monitoreo de calidad de aire de la ciudad de Bogotá, la cual cuenta con información horaria de velocidad y dirección del viento. Así mismo, ésta se puede descargar a través de internet, por lo que la consecución de los datos es de gran facilidad. Cabe anotar que la información de vientos es tal vez la más importante a la hora de la ejecución de un proyecto de modelación, puesto que finalmente éstos determinan hacia dónde se dirigirán los contaminantes de una fuente

de emisión. Al parecer, el esquema de almacenamiento de datos del Ideam no contempla la evaluación de la calidad del aire para modelos de dispersión, por cuanto no se conservan registros horarios. A pesar de todo, el aeropuerto maneja este tipo de información, pero ésta no es accesible al público y es administrada por el área de meteorología aeronáutica de la Aerocivil.

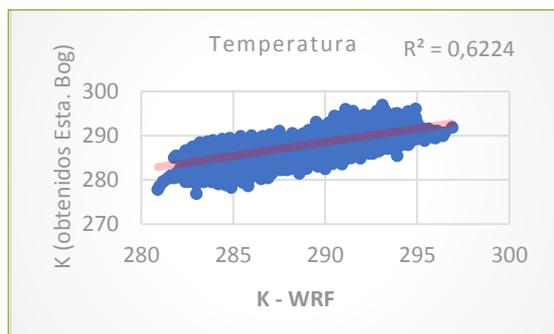
Los datos de radiación solar se consiguieron a partir de la aplicación Pysolar<sup>3</sup>. En esta aplicación se establecen las coordenadas del sitio de modelación para obtener la radiación horaria del año deseado.

La información de perfil se obtuvo a partir de los reportes de la radiosonda del aeropuerto El Dorado, en formato FSL, a través de la web <https://ruc.noaa.gov/raobs/Welcome.cgi>.

Así mismo, se compararon datos superficiales y de perfil del año 2015, obtenidos con WRF para el aeropuerto El Dorado, listos para procesar directamente en Aermet.

Los datos construidos y obtenidos externamente se procesaron en Aermet, logrando los siguientes resultados:

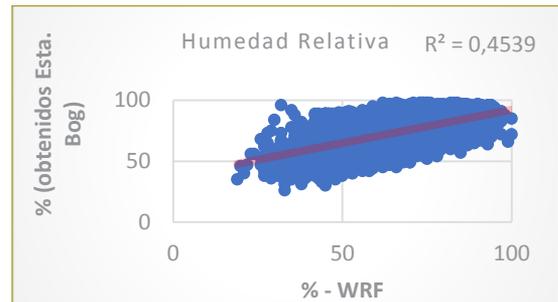
Los datos de temperatura obtenidos de la estación del aeropuerto El Dorado e interpolados entre sus tres datos reportados diariamente varían entre 276,8 K y 296,9 K. Los datos conseguidos a partir de la información del modelo WRF presentan variaciones entre 280,9 K y 296,9K. La diferencia en el promedio de temperatura entre las dos series de datos es de 0,83K. Los datos presentan una correlación baja (figura 1).



**Figura 1.** Comparación de valores de temperatura.

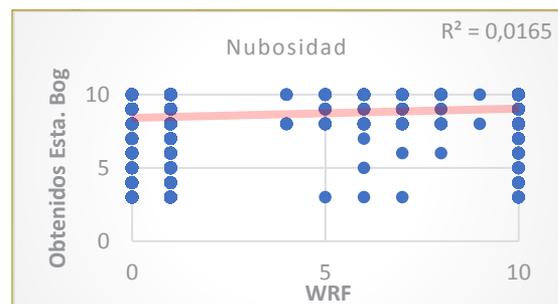
3. Pysolar es una aplicación compuesta por una colección de bibliotecas de Python para simular la irradiación de cualquier punto de la Tierra por el Sol.

La humedad relativa a nivel horario varía entre el 26 % y el 98 % para los datos interpolados de la estación del aeropuerto El Dorado, y entre 19 % y 100 % para los datos obtenidos con WRF. La humedad relativa promedio es más alta con los datos interpolados y se presenta una diferencia entre los promedios de las series de datos de 7,19 % (figura 2).



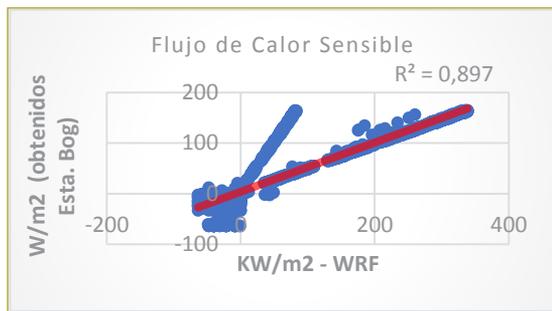
**Figura 2.** Comparación de valores de humedad relativa.

Los valores de nubosidad no tienen correlación. Para los datos obtenidos con WRF la nubosidad promedio es de 2/10, mientras que con los datos construidos es de 8/10. Esto pudo verse afectado por la interpolación efectuada, ya que dicho método puede incrementar la nubosidad significativamente (figura 3).



**Figura 3.** Comparación de valores de nubosidad.

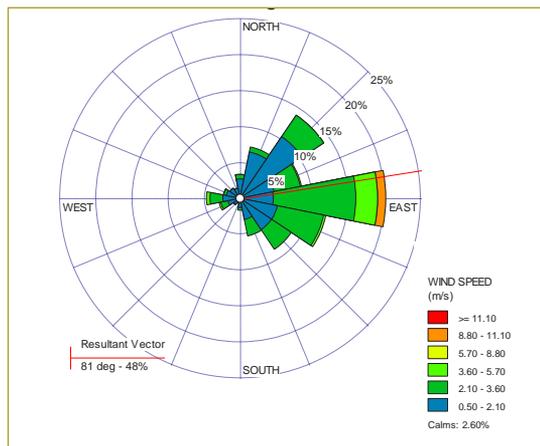
El flujo de calor sensible para la estación El Dorado varía entre  $-64$  y  $164 \text{ W/m}^2$ , mientras que los datos obtenidos a partir de WRF varían entre  $-64$  y  $339$ . Estos datos pudieron verse afectados por la nubosidad, razón por la cual los datos de la estación El Dorado presentan un flujo más bajo debido a la alta nubosidad que se obtuvo con Aermet. Sin embargo, los datos presentan una correlación moderada (figura 4).



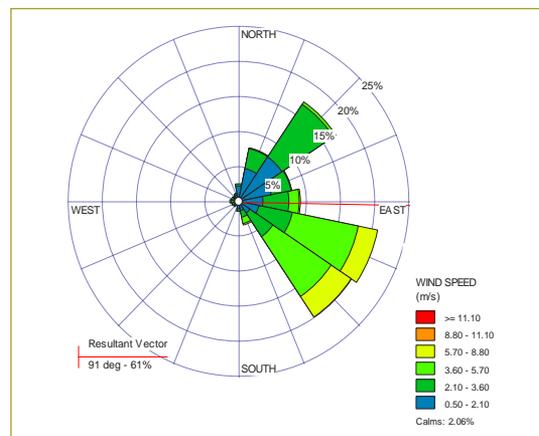
**Figura 4.** Comparación de valores de flujo de calor sensible.

En la rosa de vientos de la estación Las Ferias<sup>4</sup> se puede observar que la dirección predominante del viento corresponde a la dirección E y a la dirección NE, con velocidades predominantes entre 2,1 y 3,6 m/s y entre 0,5 y 2,1 m/s (figura 5), mientras que en la rosa de vientos obtenida con WRF se puede observar que los vientos provienen del ESE, SE y NE, con velocidades entre 3,6 y 5,7 m/s y entre 2,1 y 3,6 m/s (figura 6).

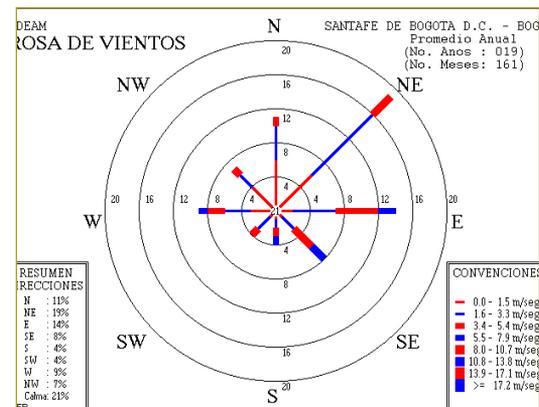
Al comparar los datos con la rosa de vientos del aeropuerto El Dorado (figura 7), se pueden observar similitudes en la dirección y velocidad del viento respecto a las rosas de viento generadas con las dos fuentes de datos. Cabe anotar que las rosas de vientos generadas corresponden al año 2015, mientras que la rosa de vientos del aeropuerto se genera a partir de datos multianuales.



**Figura 5.** Rosa de vientos obtenida con estaciones Bogotá.

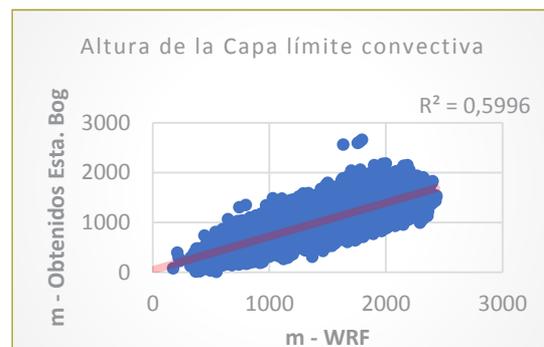


**Figura 6.** Rosa de vientos obtenida con WRF.



**Figura 7.** Rosa de vientos aeropuerto El Dorado. Fuente: Ideam, 2016.

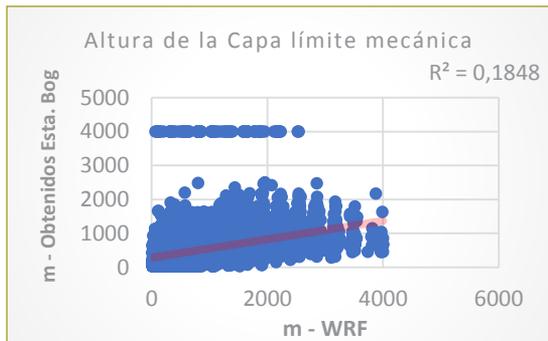
Para la altura de la capa límite convectiva se puede observar una correlación baja. Con los datos de WRF se presenta una variación de la capa de 0 a 2433 m, y con la fuente de datos del aeropuerto El Dorado esta capa se calculó entre 0 y 2101 m (figura 8).



**Figura 8.** Comparación de valores de altura capa límite convectiva.

- La estación Las Ferias es administrada por la Secretaría de Ambiente de Bogotá. En esta estación se obtuvieron datos horarios de velocidad y dirección del viento, pero se encuentra a 7 km de distancia del aeropuerto.

Los resultados obtenidos para la altura de la capa límite mecánica presentan una correlación débil y una diferencia alta en el valor promedio de esta capa. En ambas fuentes de datos se puede observar que existe una variación entre 0 y 4000 m, sin embargo, el valor promedio de esta capa generada a partir de la fuente de datos de las estaciones de Bogotá se puede observar que está 412 m por debajo respecto a la obtenida con WRF (Figura 9).



**Figura 9.** Comparación de valores de altura capa límite mecánica.

**Caso hipotético de modelación en la ciudad de Bogotá**

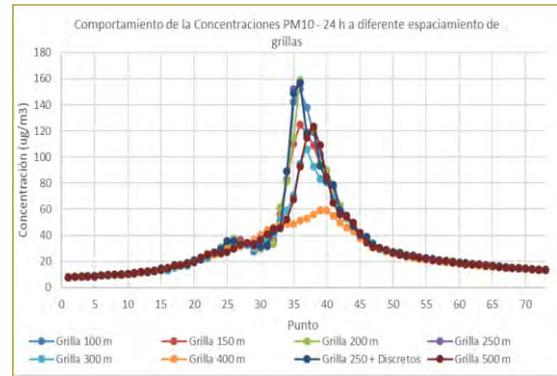
Para la modelación de PM10 se utilizaron tres tipos de fuentes de emisión. Una fuente fija puntual (chimenea), una fuente lineal de área (vía) y una fuente de área (acopio), en la que se simula la operación de un proyecto termoeléctrico.

Con el fin de determinar la mejor grilla de modelación, se efectuó un análisis de sensibilidad para identificar la variabilidad de las concentraciones de PM10 en un perfil establecido para diferentes espaciamientos de grilla, esto es, cada 100, 150, 200, 250, 300, 400 y 500 m de distancia.

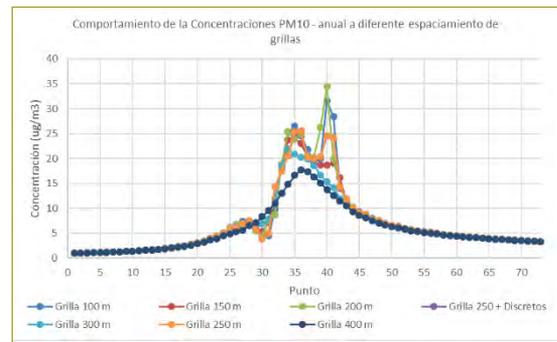
La comparación se realizó a partir de un perfil de concentraciones PM10 24 horas (figura 10) y PM10 anual (figura 11), en sentido este-oeste, entre las coordenadas X1: 596.047,8 Y1: 521522,8 y X2: 588878,2 Y2: 521532,1. En este perfil se obtuvieron 73 puntos de concentración de PM10 en una longitud de 7169,6 m.

Entre la grilla de 100 y 250 m se observa una menor variabilidad de los resultados obtenidos, por lo que se escoge la grilla con espaciamiento de 250 m para efectuar la modelación con los datos meteorológicos de las dos fuentes en estudio. Con esta grilla se logran menores tiempos de modelación (alrededor de 45 min)

en comparación con la grilla de 100 m, donde los tiempos de modelación son de más de 4 horas.



**Figura 10.** Comportamiento de las concentraciones de PM10 24 h a diferentes espaciamientos de grilla.

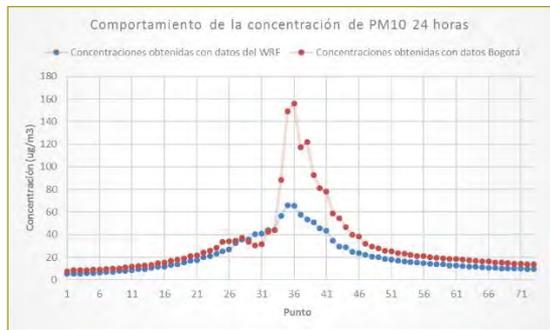


**Figura 11.** Comportamiento de las concentraciones de PM10 anual a diferentes espaciamientos de grilla.

**Comparación de los resultados del modelo de dispersión de PM10, con información meteorológica construida y obtenida de WRF**

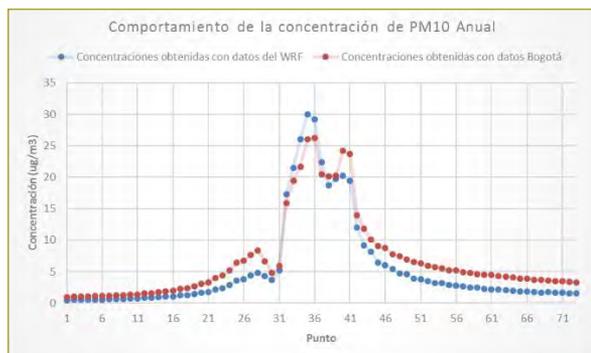
Los resultados obtenidos se compararon en el mismo perfil de concentraciones.

Para PM10 24 horas se puede observar una gran diferencia en las concentraciones máximas, las cuales se localizan cerca de las fuentes de emisión. Con la información construida a partir de la metodología propuesta, en el perfil en evaluación se obtiene un valor máximo de 156  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que con la información proveniente de WRF se alcanza un valor máximo de 65,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; esto quiere decir que con la metodología propuesta las concentraciones máximas se incrementan 236 %. Las demás concentraciones son muy similares a medida que se alejan de la fuente de emisión (figura 12).



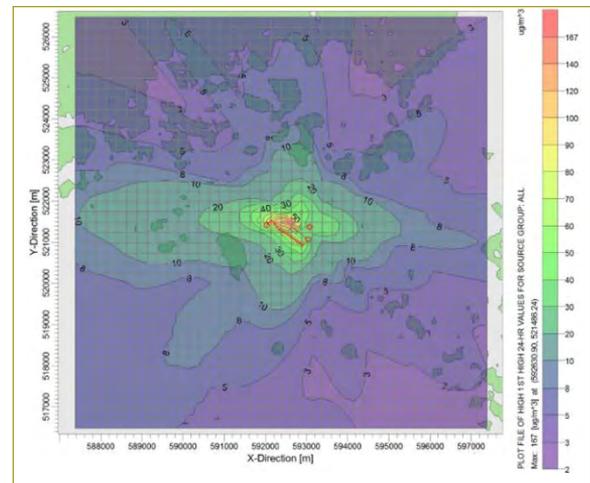
**Figura 12.** Comparación del comportamiento de las concentraciones de PM10 24 h entre las dos fuentes de estudio.

En los resultados anuales es posible observar que las concentraciones alcanzadas son muy similares para las dos fuentes de datos. En esta oportunidad, el valor máximo se obtiene con los datos de WRF, pero éstos se encuentran 11 % por encima del valor máximo conseguido con el método propuesto, mientras que en las concentraciones bajas del perfil se observa que los valores obtenidos a partir del método propuesto están por encima de los valores obtenidos con WRF.



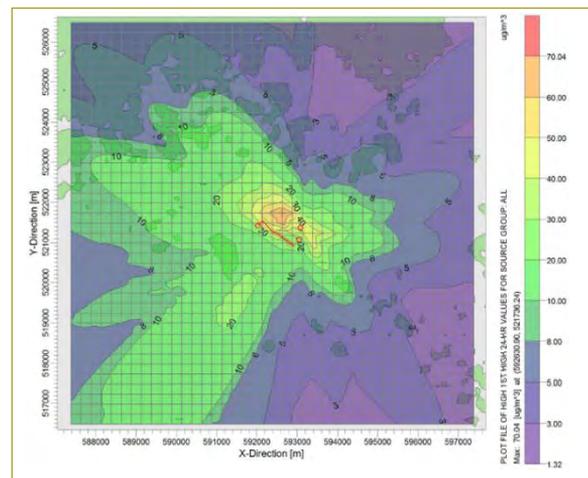
**Figura 13.** Comparación del comportamiento de las concentraciones de PM10 anual entre las dos fuentes de estudio.

En cuando a la distribución geográfica de las isoplethas, en los resultados obtenidos con datos de estaciones de Bogotá (figura 14) se observa una dispersión en todas las direcciones, con mayor amplitud en la isoplethas de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la dirección W, seguida de la isoplethas de  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en las direcciones W y SW. Las isoplethas entre 20 y  $167 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se localizan muy cerca de las fuentes de emisión, con una menor cobertura.



**Figura 14.** Pluma de dispersión – PM10 24 horas con datos de estaciones de Bogotá.

En los resultados de las concentraciones obtenidas con WRF (figura 15) se observa una mayor amplitud de la isoplethas de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la dirección SSW y en menor proporción en la dirección W. También se puede observar que hay dispersión en todos los sentidos. En este caso, las concentraciones máximas llegan a  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

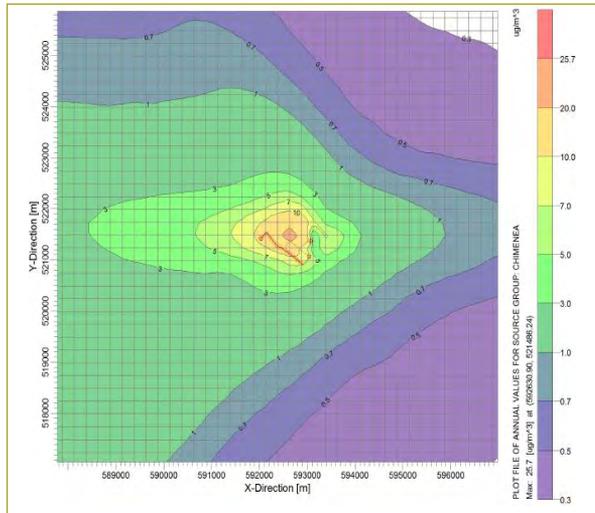


**Figura 15.** Pluma de dispersión – PM10 24 horas con datos de WRF.

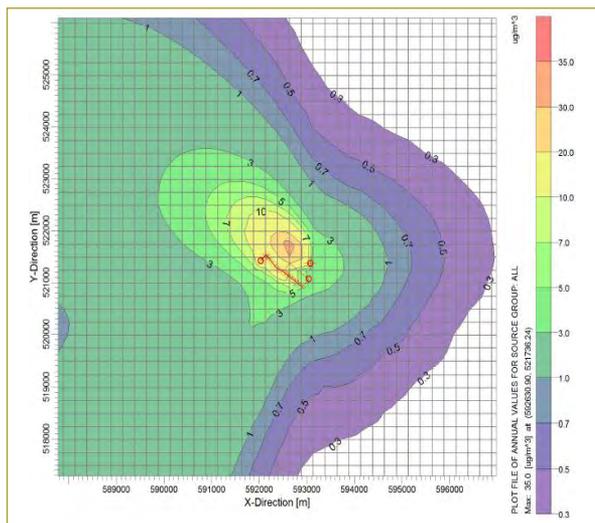
Respecto a las concentraciones de PM10 anual se puede observar que existe una mayor uniformidad en los resultados obtenidos, tanto en la forma de las isoplethas como en los niveles de concentración conseguidos para las fuentes de datos meteorológicos.

El cono de dispersión generado con los datos de estaciones de Bogotá tiene una dirección predominante W (figura 16), mientras que la pluma de dispersión

generada con WRF tiene una dirección predominante WNW (figura 17). No obstante, en este caso las concentraciones máximas anuales son mayores con la fuente de datos de WRF.



**Figura 16.** Pluma de dispersión – PM10 anual con datos de estaciones de Bogotá.



**Figura 17.** Pluma de dispersión – PM10 anual con datos de WRF.

La principal diferencia en los resultados del modelo para PM10 se produjo en los valores máximos obtenidos para la exposición de 24 horas y en la distribución espacial de las isopletras. Las concentraciones máximas obtenidas con los datos de las estaciones de Bogotá superaron en más del doble a las concentraciones máximas obtenidas con los datos de WRF. Sin embargo, a medida que se alejaban de las fuentes de emisión las

concentraciones disminuían y guardaban cierta similitud en su comportamiento con variaciones entre las concentraciones de alrededor de un 30 %. Las diferencias se pueden atribuir a la nubosidad, puesto que fue la variable con menor correlación, y la variable que puede incidir en los efectos de la radiación solar y la altura de la capa límite. Lo anterior se debe a que la nubosidad fue mucho mayor en los datos construidos que en los obtenidos con WRF.

### CONCLUSIONES

Se lograron construir los archivos meteorológicos a partir de la información horaria de temperatura, humedad relativa y nubosidad reportada por el Ideam, completando los datos faltantes mediante el método de interpolación lineal entre las 7 y las 13 horas, entre las 13 y 19 horas y entre las 19 y 7 horas del día siguiente. Sin embargo, la interpolación lineal no es una metodología que asegure la obtención de datos de acuerdo con el comportamiento de la atmósfera, por lo que sería necesario utilizar modelos estadísticos de predicción para cada variable meteorológica a partir de las series de datos del Ideam. Por esto no se puede hacer sustentación estadística de la información utilizada.

Gracias a la información meteorológica levantada y procesada se pudo correr el procesador Aermot y se obtuvieron datos con coeficientes de correlación bajos para temperatura, calor sensible, altura de la capa límite convectiva, humedad relativa y altura de la capa límite mecánica, y no hubo correlación en nubosidad. Sin embargo, no se puede establecer una correlación estadística entre las dos fuentes de datos por la diferencia entre las metodologías de evaluación.

La información meteorológica disponible es incipiente para modelación de dispersión de contaminantes en Colombia por cuanto las estaciones del Ideam no reportan datos de manera horaria, ya que no fueron diseñadas con fines de modelación o seguimiento de la calidad de aire. Por lo anterior, la información de los modelos de pronóstico de clima se sitúa como la mejor fuente de información disponible, cuando no es posible obtener los datos horarios que requiere Aermot.

Se observa una diferencia notable en los resultados de los conos de dispersión de PM10 atribuidos a la diferencia encontrada en la dirección predominante del viento entre las dos fuentes de información utilizadas,

la cual puede estar influenciada por las diferencias en la localización de las estaciones donde se obtuvo la información de velocidad y dirección del viento, ya que se encontraban a 7 km de diferencia.

Con el propósito de disminuir la incertidumbre frente al comportamiento de los conos de dispersión de los contaminantes por la dirección y velocidad del viento, se recomienda efectuar modelaciones con cinco años de información meteorológica horaria de cualquier fuente de datos. No obstante, para obtener confiabilidad en los modelos lo ideal sería utilizar series históricas de 20 años, solución que sería ineficiente por los tiempos de cómputo.

Las desviaciones más altas del modelo con las dos fuentes de datos meteorológicos se generan en las concentraciones máximas de PM10 que se obtienen en cada uno.

La definición del espaciamiento de la grilla de modelación es importante para conocer en cuál de ellas se obtiene la menor variabilidad en la concentración de los contaminantes, con el fin de no subestimar las concentraciones del modelo y conocer y optimizar los tiempos de cómputo que puede tomar cada corrida.

## REFERENCIAS

- Ahrens, C. D. (2009). *Meteorology Today: An introduction to weather, climate, and the environment*. Belmont, USA: Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Environment Protection Authority Victoria (octubre de 2013). *Construction of input meteorological data files for EPA Victoria's regulatory air pollution model (Aermod)*. Carlton, Australia.
- MAVDT (octubre de 2010). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. Bogotá, Colombia.
- Usepa (noviembre de 2004). *User's guide for the Aermod meteorological preprocessor (Aermet)*. Victoria, USA.