

Estimation of Dilution of Atmospheric Contaminants from a Paper Factory Using the AERMOD Model

Estimación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Emitidos por una Industria Papelera Mediante el Modelo AERMOD

Oscar Andrés Vidal-Daza¹, Andrea Pérez-Vidal^{2*}

¹Universidad Santiago de Cali. Facultad de Ciencias Básicas. Cali, Colombia.

²Universidad Santiago de Cali. Facultad de Ingeniería. Cali, Colombia.

*Correspondence: andrea.perez00@usc.edu.co

Recibido: 26/07/2017. Modificado: 17/10/2017. Aceptado: 08/11/2017.

Abstract

Context: Modeling of atmospheric pollutants is an useful tool for air quality monitoring and management. In this study the dispersion of three atmospheric pollutants (SO₂, NO₂ and Total Suspended Particles - TSP) emitted by a boiler from a paper factory at Valle del Cauca department was estimated and its potential impact on the population settlements located at 5 Km around the stationary source was identified.

Method: The study was structured in three stages: (i) compiling and processing of meteorological, topographic and isokinetic sampling data; (ii) modeling the dispersion of pollutants using AERMOD ViewTM; and (iii) determination of the impact on surrounding populations.

Results: The pollution plume is dispersed towards predominant directions of wind and the trajectory is affected by mountainous topography. The maximum concentrations of pollutants found (0,012 μg SO₂ /m³, 1,42 μg NO₂ /m³ and 0,109 μgTSP/m³) were lower than the Colombian air quality standards.

Conclusions: The emission-control systems used by the studied paper industry ensures compliance with the air quality standard and generates a low impact on exposed populations. In addition, the atmospheric instability conditions favored the dilution of the contaminants discharged to the atmosphere. Although the AERMOD model was useful in the modeling of pollutants under atmospheric instability conditions and short length (< 5 km), it has limitations to simulate the chemical transformations of SO₂ and NO₂, therefore it is recommended to evaluate other models that allow a comparative analysis and select the most appropriate model.

Keywords: Air quality, atmospheric pollution, dispersion of pollutants, paper industry.

Language: Spanish

Open access



Cite this work as: O. A. Vidal, A. Perez, "Estimation of Dilution of Atmospheric Contaminants from a Paper Factory using the AERMOD Model", Ingeniería, vol. 23, no. 1, pp. 31-47, 2018.

©The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.12262>

Resumen

Contexto: La modelización de contaminantes atmosféricos es un instrumento que apoya la gestión de la calidad del aire. En este estudio se analizó la dispersión de tres contaminantes atmosféricos (SO_2 , NO_2 y partículas suspendidas totales o PST) emitidos por una caldera de una empresa productora de papel, que se encuentra ubicada en el departamento del Valle del Cauca; por otro lado, se identificó su potencial afectación en los asentamientos poblacionales ubicados a 5 km alrededor de la fuente fija.

Método: El estudio se estructuró en tres etapas, la primera consistió en la recopilación y procesamiento de información meteorológica, topográfica y datos de muestreos isocinéticos; la segunda en la modelización de dispersión de contaminantes usando AERMOD ViewTM y la tercera en la definición del impacto sobre las poblaciones aledañas.

Resultados: La pluma de contaminación se dispersó hacia las direcciones predominantes del viento y su trayectoria se ve afectada por la topografía montañosa del lugar. Las concentraciones máximas de contaminantes encontradas ($0,012 \mu\text{g SO}_2 / \text{m}^3$, $1,42 \mu\text{g NO}_2 / \text{m}^3$ and $0,109 \mu\text{gTSP}/\text{m}^3$) resultaron inferiores a lo establecido en la normatividad ambiental colombiana.

Conclusiones: El sistema de control de emisiones usado por la fábrica de papel estudiada garantiza el cumplimiento de la norma de calidad de aire y genera un bajo impacto sobre las poblaciones expuestas; adicionalmente, las condiciones de inestabilidad atmosférica favorecieron la capacidad de dilución de los contaminantes descargados a la atmosfera. Aunque el modelo AERMOD resultó útil en la modelización de contaminantes bajo condiciones de inestabilidad atmosférica y corta longitud ($< 5 \text{ km}$), presentó limitaciones para simular las transformaciones químicas de SO_2 y NO_2 , siendo recomendable evaluar otros modelos que permitan realizar un análisis comparativo y seleccionar el modelo más adecuado.

Palabras clave: Calidad del aire, contaminación atmosférica, dispersión de contaminantes, industria papelera.

Idioma: Español

1. Introducción

En zonas urbanas y rurales la contaminación del aire ocasiona la muerte prematura de 3 millones de personas por año, de las cuales el 88 % se concentran en países de bajos y medianos ingresos; el 72 % de las muertes se relacionan con cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, un 14 % con neumopatía obstructiva crónica o infección aguda de las vías respiratorias inferiores y el 14 % restante con cáncer de pulmón [1]. En América Latina y el Caribe, al menos 100 millones de personas están expuestas a niveles de contaminación del aire por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los países con mayores tasas de mortalidad, en su orden, son Brasil, México, Argentina, Bolivia, Colombia, Perú, Chile, Uruguay y Ecuador, siendo los tres primeros los que presentan mayores poblaciones urbanas [2].

Los efectos en la salud respiratoria por la exposición aguda o crónica a partículas atmosféricas finas como $\text{PM}_{2.5}$, óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2) han sido demostrados científicamente y se asocian con aumentos significativos en los índices de mortalidad y morbilidad, siendo los niños uno de los segmentos poblacionales más vulnerables por estar expuestos en mayor proporción que los adultos y tener condiciones biológicas más susceptibles [3], [17].

Como parte de la gestión integral de la calidad del aire, se encuentra el uso de los modelos de predicción empleados para estimar la circulación de contaminantes en el aire y calcular su distribución espacial en un espacio determinado; la modelización de contaminantes brinda insumos para predecir y analizar la calidad del aire, contribuyendo a su vez en la toma de decisiones políticas, reglamentarias, de planificación, estudios de impacto ambiental en poblaciones expuestas, entre otras [4], [5]. Algunas autoridades ambientales colombianas utilizan la información obtenida del sistema de vigilancia de la calidad del aire (SVCA) para actividades de modelización, estudios de dispersión de contaminantes y para determinar el impacto de las actividades que afectan el estado de la calidad del aire [6]. El IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) [7] indica que cuando los datos de series anuales no cumplen con la representatividad temporal, pueden ser validados con resultados dados por sistemas de modelización.

En Europa se han desarrollado más de 120 modelos con diferentes aplicaciones, destacándose algunos paquetes de *software* como BOOT software, ASTM, AMET, JRC Tool [4], en Estados Unidos se reportan modelos como el HYSPLIT y READY, desarrollados por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), el HPDM desarrollado por el *Electric Power Research Institute*, PCCOSYMA desarrollado por el *National Radiological Protection Board* (NRPB) y el *Forshungszentrum Karlsruhe* (FZK) [8], [9], además de los sistemas de modelización recomendados por la *Environmental Protection Agency* (US-EPA) como AERMOD, CALPUFF, BLP, CALINE3 CAL3QHC/CAL3QHCR, CTDMPLUS, y OCD [10]; en Latinoamérica se resalta el *software* CCATT-BRAMS desarrollado en Brasil [11].

En Colombia, el marco normativo de calidad de aire regido por el Decreto 948 de 1995 [12] y sus resoluciones reglamentarias 601/2006 [13], 610/2010 [14], 909/2008 [15] y 1541/2013 [16], promueven el uso de los modelos de dispersión AERMOD y CALPUFF avalados por la US-EPA. A nivel mundial se han reportado diferentes estudios relacionados con el uso de AERMOD en la modelización de emisiones de dióxido de azufre (SO₂), plomo (Pb), partículas suspendidas totales (PST) y PM10 provenientes de fuentes fijas [5], [9], [17], [18]; en el ámbito nacional, se destacan algunos estudios realizados en los departamentos de Boyacá, Cesar y Cundinamarca [19]–[21]. En ciudades como Bogotá D.C., además del uso de AERMOD, se han evaluado otros modelos geoestadísticos y de pluma Gauss para predecir el nivel de contaminación por material particulado (PM10) [22], sistemas difusos evolutivos con resultados satisfactorios, mostrando las redes neuronales como una importante herramienta de predicción [23] y el modelo CCATT-RAMS para estimar el comportamiento de la atmósfera, formación, transporte y remoción de contaminantes en la ciudad y sus alrededores [24], [25].

Los mayores niveles de contaminación atmosférica en Colombia se presentan en las zonas urbanas y grandes centros industriales, los cuales agrupan alrededor del 74 % de la población [6], siendo la principal causa el uso de combustibles fósiles, ya sea por fuentes de emisiones móviles, fijas o aéreas. El 41 % del total de las emisiones se concentran en las ciudades de Bogotá D.C., Medellín y Cali [26], y los contaminantes con mayor incumplimiento de los límites máximos permisibles y con gran potencial de afectación a la salud pública son el material particulado PM2.5, PM10 y partículas suspendidas totales (PST) [7].

La participación de los distintos sectores en la contaminación del aire en el ámbito nacional se distribuye en un 86 % el transporte terrestre, 8 % la industria, 3 % termoeléctricas, 2 % en los sectores residencial y comercial y 1 % el transporte aéreo [26]. Respecto al aporte industrial, las emisiones atmosféricas procedentes de fábricas de pulpa, papel y cartón contribuyen significativamente a la contaminación del aire comparadas con otros sectores industriales, emitiendo partículas finas, partículas gruesas, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, gases de azufre y componentes organovolátiles [27]. En Colombia, este sector industrial se ubica principalmente en el Valle de Cauca (35,2 %), Bogotá D.C. (23,9 %) y Antioquia (18,6 %) [28].

En el Valle del Cauca, los principales contaminantes atmosféricos emitidos por los diferentes sectores industriales son SO_x (16 385 ton/año), material particulado PM10 (11 465 ton/año) y NO_x (3 784 ton/año), siendo la industria del papel y artes gráficas la que contribuye con la mayor emisión de SO_x (43,1 %), NO_x (38,9 %) y PM10 (55,6 %), seguida de la industria de minerales no metálicos y del sector de textiles y confecciones [29]. En Bogotá D.C., las localidades de Puente Aranda, Fontibón y Kennedy concentran el mayor número de empresas con fuentes de emisión; el 32 % de la emisión total de PM10 en la ciudad corresponde al aporte de estas fuentes puntuales, siendo la industria de papel y artes gráficas y la industria química los sectores con mayor contribución [30].

En este reporte de caso se realizó la modelización de la dispersión de los contaminantes SO_2 , NO_2 y PST emitidos por una industria papelería ubicada en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, usando el software AERMOD ViewTM, versión 16 216, con el fin de establecer los niveles de calidad de aire y potenciales impactos sobre las poblaciones aledañas. Con los resultados del estudio, también se buscó evidenciar la importancia del uso de la modelización de contaminantes como instrumento de apoyo en la gestión ambiental al interior de las organizaciones productivas y de control o vigilancia por parte de las entidades ambientales y de salud pública.

2. Materiales y métodos

El estudio se realizó en una empresa productora de papel ubicada en el departamento Valle del Cauca, Colombia, modelando las emisiones de SO_2 , NO_2 y PST provenientes de una caldera de recuperación que emplea como sistema de control de emisiones un precipitador electrostático.

La caldera es usada para recuperar los químicos del proceso de cocción de fibra y para la producción de vapor utilizado en el proceso. Dependiendo del origen de la fibra, esta se dispone en digestores y se somete a un proceso de cocción utilizando presión de vapor, altas temperaturas y una solución de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio, denominada licor blanco. Como resultado, se obtiene la transformación de material fibroso en pulpa más licor negro. El licor negro entra a la caldera de recuperación como combustible, donde se quema la fracción orgánica (lignina y otros compuestos azucarados de la fibra vegetal) liberando energía en el proceso de combustión, la cual es aprovechada en forma de vapor para las necesidades de la planta. La fracción inorgánica que no es quemada (sales minerales, sulfuro de sodio, Na_2S , y carbonato de sodio, Na_2CO_3), se recupera después del proceso de combustión para ingresar nuevamente al sistema de digestión. La metodología de la investigación se estructuró en tres etapas: recopilación y procesamiento de información, modelización de la dispersión de contaminantes y definición del impacto sobre asentamientos poblacionales.

2.1. Recopilación y procesamiento de información

Se recopilaron datos meteorológicos de superficie y de perfil atmosférico vertical de un año, generados por el modelo de pronóstico meteorológico de mesoescala WRF (*the Weather Research and Forecasting*) [18]; se adquirió información en formatos PFL y SFC, generados a partir de archivos UA y SAM respectivamente. Esta información fue adquirida a través de la contratación de un tercero que ha adaptado el modelo WRF a las condiciones del territorio colombiano con las siguientes especificaciones:

- Resolución espacial de 6 km (distancia horizontal entre puntos de grilla) para todo el territorio nacional.
- 32 niveles desde superficie hasta 50 mb con una densidad máxima en superficie.
- Simulación explícita de las nubes con cinco tipos de hidrometeoros (vapor, agua líquida, nieve, hielo y graupel).
- Simulación de la radiación de onda corta y larga separada por once y dieciséis bandas respectivamente.
- Capa límite según teoría de similitud con cierre combinado local y no-local según régimen de estabilidad.
- Cálculo del balance hídrico en superficie, suelo y canopy.

Las variables meteorológicas analizadas fueron: precipitación, nubosidad, radiación solar, temperatura ambiente, dirección del viento, velocidad del viento, presión atmosférica, humedad relativa y perfil atmosférico vertical. Por ser un modelo regional, se emplearon como datos de entrada atmosféricos los provenientes de un modelo global, más las condiciones de frontera en superficie como los datos de topografía, uso de suelos y temperatura superficial del mar como se expone a continuación.

- Datos atmosféricos: las condiciones atmosféricas iniciales y de frontera se extrajeron de datos del proyecto CFSV2 (*Climate Forecast System Version 2*) [31], usando solo los datos que han sido puestos en coherencia con observaciones reportadas por la red mundial de estaciones meteorológicas.
- Datos de superficie: debido a que el modelo digital de terreno del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) no está validado para el territorio colombiano, se empleó el modelo digital de elevación elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y validado en campo. Los datos de uso de suelo provienen del sensor MODIS a una resolución de 500 metros con fecha de actualización de 2012.

La ubicación topográfica satelital del área de estudio y asentamientos poblacionales expuestos a la contaminación, se establecieron a partir de imágenes satelitales extraídas de Google Earth usando los procesadores AERMAP y AERMOD 3D, como se muestra la Figura 1, en la cual se observa la fuente fija ubicada sobre terreno plano y rodeada por seis asentamientos humanos, además de existir terreno montañoso sobre el lado oeste del área de estudio.

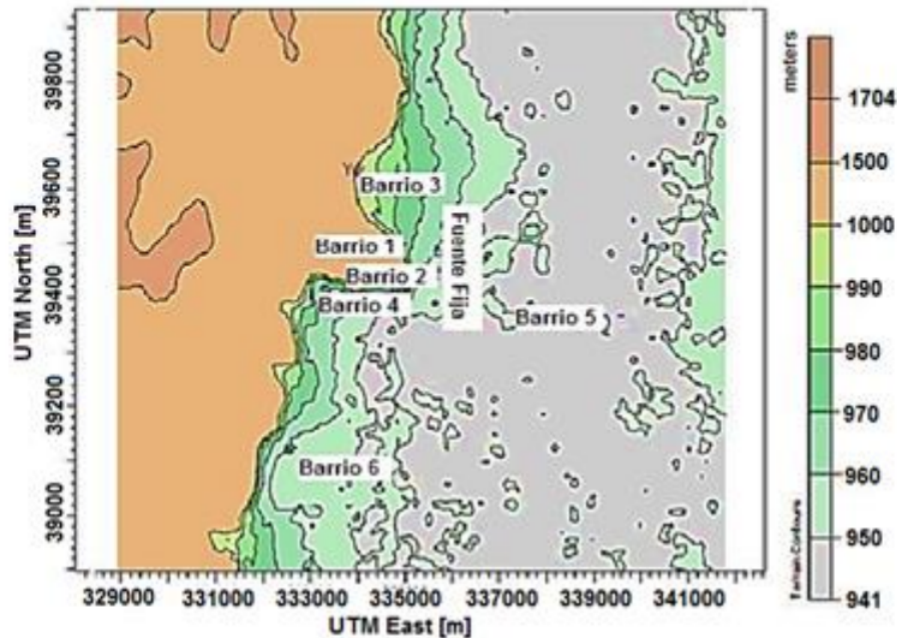


Figura 1. Características topográficas del área de estudio y ubicación de asentamientos poblacionales.

La información específica de la fuente, requerida para la modelización, se obtuvo con planos de diseño de la caldera de recuperación y mediciones isocinéticas. La fuente de emisión se catalogó en el *software* como fuente puntual y presentaron las características y variables descritas en la Tabla I, resaltándose que los datos de emisión de los contaminantes fueron obtenidos a partir de tres muestreos isocinéticos realizados en días consecutivos por un laboratorio acreditado por el IDEAM bajo la norma ISO 17025, usando la metodología estandarizada de la EPA (métodos del uno al siete).

Tabla I. Parámetros de entrada de la fuente fija.

Parámetro	Caldera de recuperación	Unidades
Ubicación UTM	X:335972,33	m
	Y:394120,89	m
Tipo de Fuente	Puntual	-
Emisión del contaminante	PST 0,53	
	SO ₂ 0,056	g/s
	NO ₂ 6,89	
Diámetro de la chimenea	2,5	m
Área de la chimenea	4,91	m
Altura de la chimenea (descarga)	67	m
Velocidad de salida del gas	18,64	m/s
Temperatura del gas	177,2	°C
Capacidad nominal de vapor	543414	Lb/h
Producción de vapor promedio anual	281,083	Lb/h
Producción de vapor promedio durante el estudio	326,794	Lb/h
Tiempo de operación de la caldera	24	h/día

2.2. Modelización de la dispersión de contaminantes

A partir de la información recopilada se procedió a la sistematización de datos requeridos y la ejecución de los modelos de dispersión para los contaminantes de interés utilizando el *software*

AERMOD View™; esta herramienta informática está compuesta por tres procesadores: AERMOD (procesador que genera el modelo de dispersión usando la topografía y meteorología de la zona), AERMAP (preprocesador topográfico encargado de realizar las curvas de nivel del área a partir de imágenes satelitales) y AERMET (preprocesador meteorológico) [10]. La Tabla II sintetiza la configuración empleada en AERMET v151981.

Tabla II. Configuración empleada en AERMET	
Etapa 1: Extracción	
Upper air	
Intervalo de tiempo (yy/mm/dd)	01/01/16 a 31/12/16
Ubicación de la estación (Grados decimales)	76,48W – 3,56N
Ajuste de tiempo a hora local (ajuste positivo en coord. Oeste)	5
Surface	
Intervalo de tiempo (yy/mm/dd)	01/01/16 a 31/12/16
Ubicación de la estación (Grados decimales)	76,48W – 3,56N
Ajuste de tiempo a hora local (ajuste positivo en coord. Oeste)	0
Etapa 2: Compilación	
MERGE	
Intervalo de tiempo (yy/mm/dd):	01/01/16 a 31/12/16
Etapa 3: Preparación de datos para AERMOD	
SECTORES	Según uso de suelo a 5 km a la redonda de datos de superficie
Numero de sectores:	2
Sector 1	276° a 354°; Uso de suelo predominante Residencial de baja densidad
Sector 2	354° a 276°; Uso de suelo predominante. Cultivos en hileras
Periodo de sectores:	Mensual

Como datos de entrada para el modelo, se tuvieron en cuenta los siguientes:

- Área de modelización: 5 km de radio alrededor de la fuente fija para cubrir los asentamientos poblacionales.
- Características de la fuente, información meteorológica y elevaciones del terreno: se emplearon datos recopilados y analizados previamente en la primera etapa.
- Receptores: se elaboró una malla de receptores tipo cartesiana, incluyendo seis receptores discretos expuestos a la fuente de emisión.
- Tiempo de modelización: se realizó un modelo de dispersión en frecuencia anual.

2.3. Definición del impacto sobre asentamientos poblacionales

Con los resultados de la modelización se realizó un análisis del impacto generado por la emisión de los contaminantes sobre los asentamientos poblacionales cercanos al área de estudio, en un radio de 5 km alrededor de la fuente de emisión. Se empleó como referencia la Norma Colombiana de

Calidad de Aire, Resolución 610/2010 [15], sobre la cual se realizó la conversión de las condiciones de referencia (25°C y 760 mmHg) a condiciones locales (24°C y 676 mmHg) como lo indica la Resolución 601/2006 [13].

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de información meteorológica y topográfica

En el área de estudio predominaron los vientos del oeste-noroeste (WNW) que soplaron hacia el este-sudeste (ESE) con velocidades entre 2,10-11,10 m/s con una frecuencia anual de aparición mayor al 36 %, como se observa en la rosa de vientos y la distribución de frecuencia de velocidades del viento obtenidas con el procesador AERMET (Figura 2, Figura 3). El modelo representa una velocidad y dirección media a partir de datos de velocidad y dirección de un año, sin incluir todos los perfiles.

Teniendo en cuenta que la velocidad y dirección de los vientos influyen considerablemente en la dispersión o dilución de los contaminantes emitidos [32], los resultados obtenidos fueron comparados con las rosas de vientos reportadas anualmente por la entidad ambiental, usando como referencia la estación meteorológica más cercana al área de estudio, observándose que la dirección WNW es una de las más influyentes en esta zona [33].

Respecto a las velocidades de viento, predominaron valores entre 0,5-2,1 m/s con un 39,7 % promedio anual, seguido de velocidades entre 2,10-8,80 m/s con una frecuencia del 40,4 %. Los vientos con velocidad < 0,5 m/s presentaron un bajo porcentaje del 2,8 %, condición favorable para la zona de estudio, puesto que este tipo de vientos de calma, combinados con el crecimiento urbano, uso de combustibles fósiles y presencia de otras fuentes de emisión, pueden comprometer la calidad del aire generando un ambiente nocivo para la población al no favorecer la dispersión de los contaminantes [3].

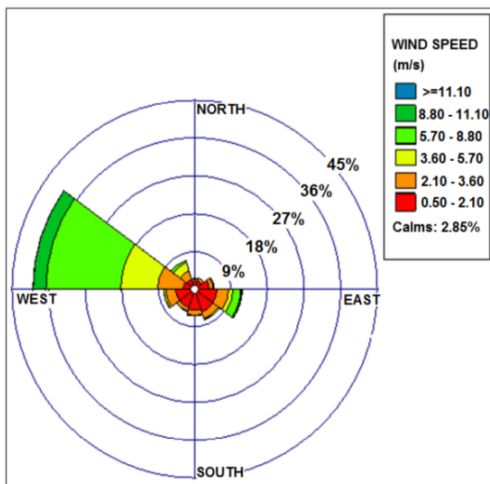


Figura 2. Rosa de los vientos.

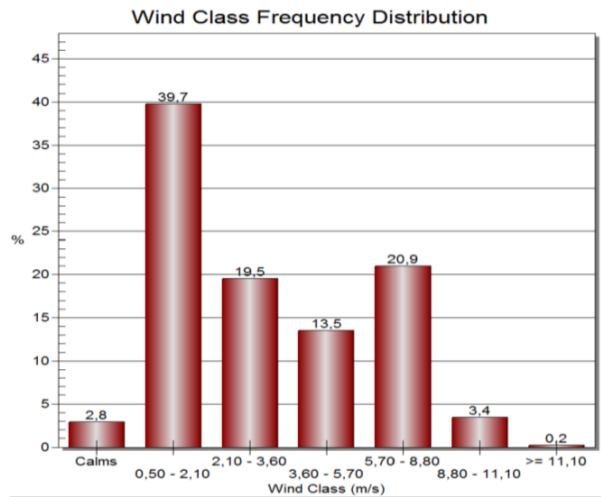


Figura 3. Distribución de frecuencias de velocidad del viento.

La Tabla III describe la variación mensual de la velocidad del viento, la temperatura, precipitación y radiación solar obtenidos a partir de los datos horarios medidos durante un año; se resalta que la velocidad media anual del viento fue de 3,5 m/s, la cual se concentró en una frecuencia del 19,5 % como lo indica la Figura 3.

Tabla III. Variación mensual de datos meteorológicos.

Mes	Velocidad del viento m/s	Temperatura °C			Precipitación acumulada (mm/mes)	Radiación Solar (W/m ²)
		Media	Máxima	Mínima		
Enero	2,5	24,3	31,8	19,6	225,0	427,4
Febrero	3,0	24,5	31,7	19,8	120,0	396,2
Marzo	3,7	24,0	31,8	19,3	450,0	386,5
Abril	3,5	24,0	31,8	19,2	170,0	418,5
Mayo	3,4	24,2	31,5	19,5	45,0	370,2
Junio	3,1	24,7	31,7	19,7	70,0	235,0
Julio	4,1	24,3	32,1	18,7	15,0	357,0
Agosto	5,1	25,2	33,0	19,0	40,0	340,8
Septiembre	3,5	25,3	33,7	19,0	100,0	219,6
Octubre	3,2	24,3	31,6	19,2	75,0	356,9
Noviembre	3,3	23,7	29,9	19,6	130,0	352,7
Diciembre	3,4	24,7	32,0	19,0	30,0	332,3
Promedio	3,5	24,4	31,9	19,3	1.470,0*	349,4

*Precipitación acumulada en el año

En la zona de estudio, la temperatura presentó un valor medio anual de 24,4 °C con un rango de variación entre 19 °C y 33,7 °C y se clasificó como una zona cálida de acuerdo con Unesco-FAO [34] por presentar temperaturas mayores a 15 °C en el mes más frío (noviembre). Cabe anotar que la temperatura influye en la densidad de los gases, la combinación de aire y gas denso puede generar turbulencias que afectan la altura de mezcla y definen la estabilidad atmosférica del lugar, afectando a su vez afecta la dispersión de los contaminantes [32].

Con relación a la precipitación, en Colombia existen dos tipos de régimen: monomodal y bimodal. El primero se caracteriza por presentar una temporada seca y una lluviosa durante el transcurso del año y en el segundo se registran dos temporadas secas alternadas con dos lluviosas [35]. La zona de estudio presentó un régimen bimodal con dos periodos lluviosos entre los meses de enero y abril y septiembre y noviembre, siendo probable que en este periodo los mecanismos naturales de remoción de material particulado y NO_x se vean favorecidos por efecto de arrastre y deposición húmeda [5], [36].

En Colombia, la precipitación mensual en el ámbito local está determinada por los sistemas de nubosidad asociados a la circulación local de cada vertiente y, a su vez, está condicionada por la altitud, la orientación de las montañas y la actividad convectiva de cada localidad; las regiones de mayor precipitación pueden alcanzar valores anuales de 12 700 mm y las regiones más secas valores entre 350-400 mm/año, en general, núcleos secos se acercan a 1000 mm/año [37], por lo que puede decirse que el área de estudio no presenta condiciones secas.

Se observó que la radiación solar presentó un valor medio anual de 349,4W/m², con valores altos en los meses de enero y abril y valores mínimos mensuales en junio y septiembre. Los valores medios anuales de radiación solar y velocidad del viento (3,5 m/s) fueron empleados para

determinar la estabilidad atmosférica en la zona de estudio utilizando la clasificación F.A. Gifford y Pasquill, obteniéndose una categoría C que correspondió a una atmósfera ligeramente inestable. Aunque una de las ventajas del uso de las clases de condición atmosférica P-G es el reducido conjunto de datos meteorológicos necesarios, los cuales facilitan la toma de decisiones con fines regulatorios o respuesta rápida frente a eventos de contaminación [8].

La estabilidad atmosférica influye en la dispersión de contaminantes, siendo por lo tanto una variable de gran relevancia durante la modelización en una atmósfera estable los contaminantes presentarán baja dispersión y, como consecuencia, la concentración de estos aumentará. Esta situación, unida a condiciones meteorológicas y climatológicas desfavorables, puede causar impactos negativos sobre la población [32]. En el área de estudio puede afirmarse que la estabilidad categoría C, favoreció la circulación vertical de la atmósfera, produciendo una mezcla de aire considerable que puede ayudar a la dilución de los contaminantes [5], [8], [9].

Respecto a las características topográficas del área de estudio, se observó que existen dos zonas diferenciadas por la altura sobre el nivel del mar, la primera considerada plana (941-960 msnm) y la segunda montañosa (1000-1500 msnm) ubicada al oeste, condiciones de terreno que pueden influenciar la dispersión y arrastre de elementos contaminantes a través del aire [36]. La topografía, unida a la dirección y velocidad del viento, condiciona la dispersión de los contaminantes, así para zonas de topografía simple se consigue un flujo libre en la dirección predominante del viento y un flujo turbulento en la zona compleja [20].

La zona de montaña ubicada al oeste (W) de la empresa productora de papel presentó una larga extensión hacia el norte y el sur, fue tomada en cuenta para el análisis del impacto sobre los asentamientos humanos, puesto que esta condición topográfica podía resultar un posible obstáculo en el flujo de salida de los contaminantes emitidos por la fuente fija, formando el efecto *downwash*, el cual puede ser modelado por AERMOD [8], [38].

La topografía en general, juega un papel fundamental en el comportamiento de la atmósfera, sirviendo de obstáculo a las corrientes de aire que arrastran contaminantes y pueden acumularse por la obstrucción, además de cambiar la cantidad de radiación solar recibida por la superficie terrestre a lo largo del día, lo que a su vez influye en la generación de diferencias de presión atmosférica que producen movimientos de masas de aire [39], [40].

3.2. Modelización de la dispersión de contaminantes

Para la modelización se empleó como punto de referencia la ubicación geodésica de $3^{\circ}36'34,10''\text{N}$, $76^{\circ}31'19,95''\text{W}$ correspondiente a la zona de estudio y se extendió el dominio de modelo a 10 km al norte (N) y 10 km al este (E), de esta manera se aseguraron los 5 km alrededor de la fuente de emisión

La ubicación de los asentamientos poblacionales y edificaciones cercanas a la fuente de emisión se realizó mediante la elaboración de una malla de receptores tipo cartesiana conformada por 101 puntos espaciados cada 100 metros a 5 km a la redonda. Se ubicaron seis receptores discretos como se muestra en la Tabla IV.

Tabla IV. Asentamientos poblacionales cercanos a la fuente de emisión

Barrio	Ubicación respecto a la fuente de emisión	Distancia a la fuente de emisión (Km)	Georeferenciación	Altura sobre el nivel del mar (m)
N ⁰ 1	Norte	0,9	3 ⁰ 34' 14,28" N - 76 ⁰ 28' 42,34" W	962
N ⁰ 2	Nor Oeste	1,0	3 ⁰ 34' 02,13" N - 76 ⁰ 29' 07,57" W	995
N ⁰ 3	Nor Oeste	2,5	3 ⁰ 34' 52,02" N - 76 ⁰ 29' 34,05" W	995
N ⁰ 4	Sur Oeste	1,8	3 ⁰ 33' 47,08" N - 76 ⁰ 29' 38,61" W	988
N ⁰ 5	Este	3,0	3 ⁰ 33' 42,63" N - 76 ⁰ 26' 59,95" W	949
N ⁰ 6	Sur Oeste	4,0	3 ⁰ 31' 51,03" N - 76 ⁰ 29' 49,56" W	968

Dentro del área de modelización se consideró como edificación o estructura grande la zona montañosa donde el impacto de la dispersión de contaminantes se contempló en el modelo, las edificaciones restantes fueron ubicadas a nivel de suelo por no presentar alturas relevantes. Los resultados de la modelización se sintetizan en la Figura 4, la Figura 5 y la Figura 6 que muestran los mapas de isoconcentraciones, detallando las curvas de concentración (isopletas) en promedio anual de los contaminantes dióxidos de azufre, dióxido de nitrógeno y PST. Los datos promedios anuales son entregados por el modelo, el cual tiene la capacidad de entregar modelos de contaminantes en diferentes sentidos horarios (por hora, cada veinticuatro horas, mensual, anual); en este caso, la resolución temporal de salida de los datos simulados fue anual. Estos datos promedios anuales se obtuvieron a partir de la información meteorológica de un año proveniente del modelo de pronóstico WRF.

El modelo de dispersión de los tres contaminantes presentó una tendencia similar, evidenciándose que los mayores valores de concentración se ubicaron cerca de la fuente de emisión, los cuales fueron disminuyendo a medida que se alejaban de ella por un efecto de dilución de la concentración de contaminantes. Los resultados confirman que el transporte de los contaminantes sigue las direcciones predominantes del viento como se mostró en la rosa de los vientos, la dirección oeste-noroeste (WNW), resultado acorde con lo planteado por algunos autores que afirman que un contaminante emitido a la atmósfera es distribuido por la dirección predominante del viento [32], [41].

Se observó que la zona montañosa del área de estudio influyó en la dispersión de los contaminantes que son arrastrados por el viento en dirección NW, los cuales, al chocar con este obstáculo topográfico, buscan bordearlo y se dispersan en sentido norte y sur, confirmando la influencia de las características topográficas sobre la dispersión y concentración de los contaminantes a nivel del suelo [20], [39], [40].

La Tabla V muestra los valores de las concentraciones máximas obtenidas en la modelización para SO₂, NO₂ y PST comparados con la Norma Colombiana de Calidad del Aire, ajustada a condiciones locales. Las máximas concentraciones de emisión de contaminantes obtenidas con la modelización resultaron muy inferiores a lo establecido en la Norma Colombiana de Calidad del Aire, mostrando que el precipitador electrostático empleado en la caldera, como sistema de control de emisiones, está garantizando una reducción considerable de los contaminantes emitidos, dando cumplimiento a la reglamentación nacional. Adicionalmente, los mapas de isoconcentraciones indicaron que estas concentraciones se localizaron hacia el área menos poblada (lado inferior derecho, ESE), condiciones que reducen los riesgos a la salud de las poblaciones aledañas a la fuente de emisión.

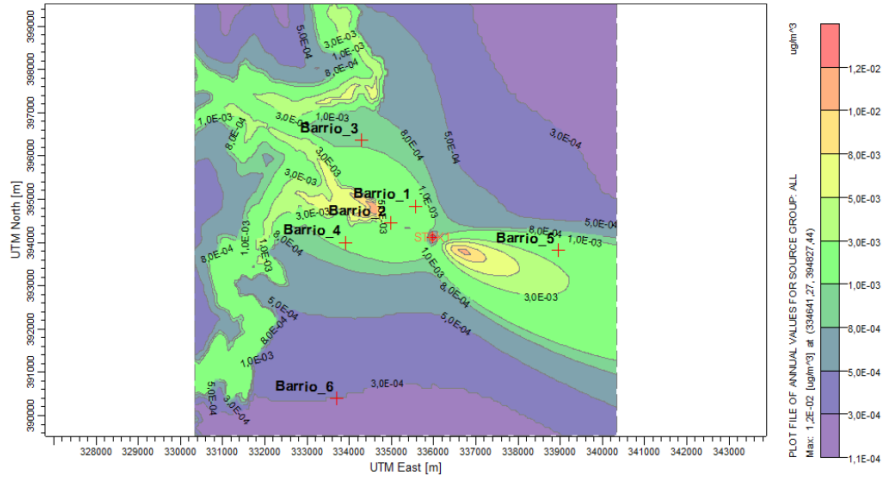


Figura 4. Modelo de dispersión de dióxido de azufre.

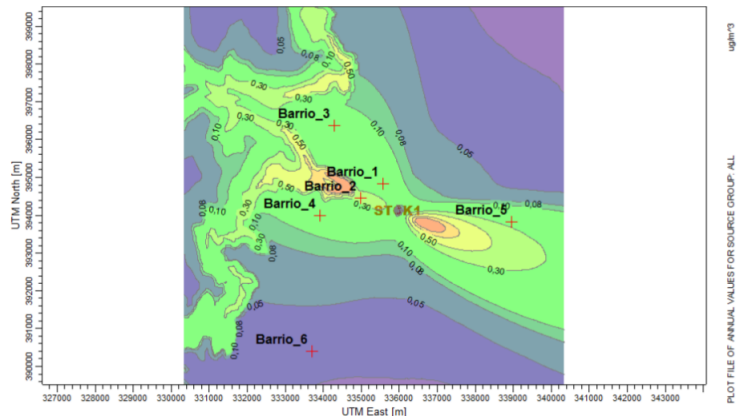


Figura 5. Modelo de dispersión de óxido de nitrógeno.

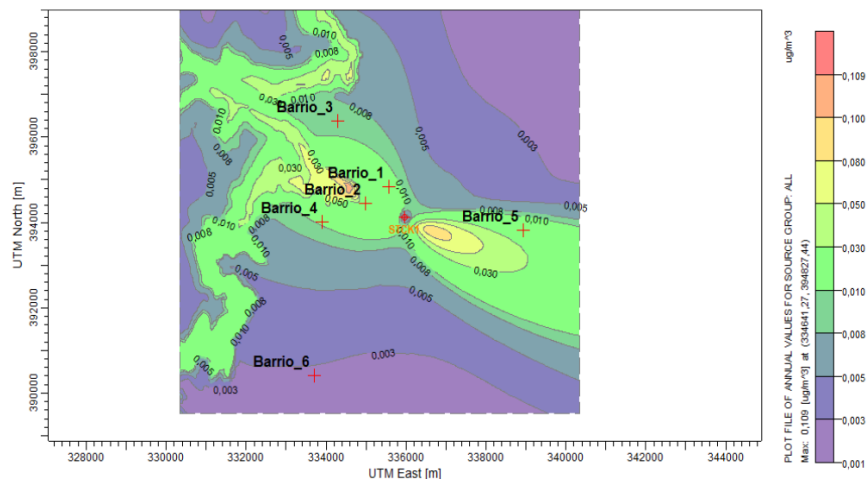


Figura 6. Modelo de dispersión de partículas suspendidas totales.

Tabla V. Máxima concentración obtenida en la modelización comparada con la reglamentación nacional.

Contaminante	Res 610/2010		Resultado de la Modelización	
	Concentración máxima permisible $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *		Concentración máxima $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Coordenadas UTM(m)
SO ₂		71,4	0,012	336798,8 X 393639,55 Y
NO ₂	Anual	89,2	1,42	336798,8 X 393639,55 Y
PST		89,2	0,1089	336798,8 X 393639,55 Y

*Valor calculado para condiciones locales [13]

Aunque el modelo AERMOD ha mostrado su aplicabilidad y confiabilidad en la modelación de material particulado [18], tiene una limitación entorno a la modelización de contaminantes gaseosos como NO₂ y SO₂ por no contar con el módulo de reacción, lo que impide modelar las posibles transformaciones químicas en la atmósfera, limitando su predicción a una distancia máxima de 5 km desde el punto de emisión, principalmente en época húmeda [5]. En los estudios de análisis de riesgos en la salud, esta limitación restringe las proyecciones en tiempo, para este tipo de contaminantes, siendo recomendable complementar la modelización con la aplicación de otros modelos que consideren este aspecto, como los modelos eulerianos tridimensionales; estos modelos tridimensionales, además, utilizan múltiples mediciones de viento en las direcciones horizontal y vertical, incluyen efectos de terreno y cizalladura del viento vertical y horizontal y tratan variables de parámetros más realistas como la rugosidad de la superficie, la deposición y la estabilidad atmosférica variable [32].

3.3. Definición del impacto sobre asentamientos poblacionales

Los modelos de dispersión proporcionan una representación confiable de la calidad del aire del sector [41], principalmente para contaminantes particulados, siendo de gran utilidad como estrategia de gestión ambiental en las empresas que emiten contaminantes atmosféricos durante sus procesos productivos, sirviendo a su vez de instrumento de apoyo en la vigilancia y protección de la salud pública. En la Tabla V se enlistan los seis asentamientos o receptores poblacionales identificados a 5 km de la fuente fija, ubicados de mayor a menor impacto y especificando los niveles respirables de los contaminantes evaluados.

El receptor más impactado fue el barrio N^o 2 por estar expuesto a las concentraciones más altas de NO₂, el menos afectado fue el barrio N^o 6, probablemente por ser el asentamiento ubicado a mayor distancia de la fuente fija y no estar influenciado por la dirección de los vientos, lo que favorece la capacidad para diluir la concentración de los contaminantes.

La estabilidad atmosférica de la zona de estudio (clase C, ligeramente inestable) también favoreció la capacidad de la atmósfera para diluir los contaminantes que son descargados sobre ella [48], siendo un fenómeno favorable para los receptores de la zona de estudio, permitiendo mantener bajos niveles de contaminación del aire y ayudando a proteger la salud cardiovascular y respiratoria de la población [9]. Aunque los resultados de la investigación mostraron que no existe un impacto significativo de las emisiones de SO₂, NO₂ y PST sobre los receptores poblacionales identificados en el estudio, es necesario considerar que en esta área existen otras industrias y fuentes fijas que podrían contribuir al deterioro de la calidad del aire sobre los receptores estudiados, siendo recomendable realizar una modelización integral que considere todas las emisiones fijas que actualmente afectan la zona de estudio.

En general, se observó que la modelización de contaminantes resultó una herramienta útil para conocer el estado de la calidad del aire, facilitar la identificación de zonas vulnerables y con mayor potencial de afectación de la salud humana. Esta herramienta permite conocer los contaminantes cuyas concentraciones superan los niveles máximos permisibles establecidos en la normatividad nacional, su distribución en el tiempo y en el espacio y las fuentes de emisión asociadas a estos, contribuyendo a la formulación de políticas públicas en el ámbito nacional encaminadas a la protección del bienestar de la población, del medio ambiente y sirviendo de apoyo en la toma de decisiones por parte de las empresas y las autoridades ambientales y de salud.

Hay que tener en consideración que, por lo general, los estudios de análisis de riesgo enfatizan sus resultados considerando condiciones atmosféricas neutrales, cuando en la mayoría de los sitios industriales existen condiciones atmosféricas no neutrales; modelos como AERMOD funcionan bajo suposiciones de condiciones meteorológicas uniformes siendo menos eficientes que otros los modelos que pueden simular la dispersión en condiciones no uniformes y espacialmente variables, como CALPUFF [32]. Sin embargo, algunos estudios han mostrado que las estimaciones de dispersión arrojadas por el modelo AERMOD, comparadas con modelos como CALPUFF, resultan más conservadoras, por lo que en términos de reglamentación puede reducir el riesgo a la salud y proteger mejor a la población [18]; adicionalmente, hay que tener en consideración si la emisión es de forma continua o instantánea, en la primera el tiempo de liberación y muestreo se comparan con el tiempo de viaje de la fuente al receptor siendo útil para distancias de menos de 10 km y en la segunda, el tiempo de liberación o el tiempo de muestreo es más corto comparado con el tiempo de viaje, siendo adecuado para distancias mayores a 30 km [32].

Tabla VI. Asentamientos poblacionales potencialmente impactados por la emisión de contaminantes.

Impacto de mayor a menor	Asentamiento Poblacional	Ubicación respecto a la fuente de emisión	Distancia a la fuente de emisión (Km)	Inmisión de SO ₂ (μ/m ³)	Inmisión de NO _x (μ/m ³)	Inmisión de PST (μ/m ³)	Altura sobre el nivel del mar (m)
1	Barrio N ^o 2	Nor-Oeste	1,0	1 x 10 ⁻³	0,3	1 x 10 ⁻²	995
2	Barrio N ^o 1	Norte	0,9	1 x 10 ⁻³	0,1	1 x 10 ⁻²	962
3	Barrio N ^o 4	Sur-Oeste	1,8	1 x 10 ⁻³	0,1	1 x 10 ⁻²	995
4	Barrio N ^o 3	Nor-Oeste	2,5	1 x 10 ⁻³	0,1	1 x 10 ⁻²	988
5	Barrio N ^o 5	Este	3,0	1 x 10 ⁻³	0,1	1 x 10 ⁻²	949
6	Barrio N ^o 6	Sur-Oeste	4,0	1 x 10 ⁻⁴	3 x 10 ⁻²	1 x 10 ⁻³	968

4. Conclusiones

Los resultados de la modelización evidenciaron que los valores de las concentraciones máximas de SO₂ (0,012 μg/m³), NO₂ (1,42 μg/m³) y PST (0,109 μg/m³) son inferiores a lo establecido en la Norma Colombiana de Calidad del Aire, indicando el adecuado funcionamiento del sistema de control de emisiones con el que cuenta la empresa papelera, lo que reduce los potenciales impactos sobre las poblaciones expuestas.

La trayectoria seguida por los contaminantes atmosféricos emitidos se encuentra fuertemente influenciada por las direcciones predominantes de los vientos y afectada por la topografía del lugar.

Adicionalmente, las condiciones de inestabilidad atmosférica favorecieron la capacidad de dilución de los contaminantes descargados a la atmósfera.

El software AERMOD ViewTM resultó una herramienta útil y de fácil manejo para la modelización de la dispersión de los contaminantes PST, SO₂ y NO₂, siendo recomendable para sitios con inestabilidad atmosférica y corta longitud (< 5 km), condiciones que se tuvieron durante el estudio; sin embargo, hay que tener en consideración las limitaciones del modelo para la modelización de contaminantes gaseosos al no simular las transformaciones químicas que puedan tener los contaminantes gaseosos SO₂ y NO₂, al igual que el uso de la clasificación Pasquill-Gilfford para el cálculo de la estabilidad atmosférica. Por lo tanto, es recomendable evaluar otros modelos que permitan validar y realizar un análisis comparativo y de este modo seleccionar el modelo más adecuado.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al ingeniero Germán Bolaños por su valiosa colaboración y asesoría técnica durante el desarrollo del proyecto.

Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud, *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud* <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/> ↑32
- [2] G. Joanne and S. Sánchez, *La calidad del aire en América Latina: una visión panorámica*. 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.cleanairinstitute.org/calidaddelaireamericalatina/cai-report-spanish.pdf> ↑32
- [3] C. Ubilla and K. Yohannessen, “Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño”. *Rev. Med.Clin.Condes.*, vol. 28, no. 1, pp. 111-118, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2016.12.003> ↑32, 38
- [4] European Environment Agency, *Modelling*. 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/TEC11a/page011.html> ↑33
- [5] K. Seangkiatiyuth *et al.*, “Application of the AERMOD Modeling System for Environmental Impact Assessment of NO₂ Emissions from a Cement Complex”. *J. Env. Sci.*, vol. 23, no. 6, pp. 931-940, 2011. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60499-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60499-8) ↑33, 39, 40, 43
- [6] Instituto de Hidrología y Meteorología de Estudios Ambientales - IDEAM, *Informe de estado de la calidad del aire en Colombia 2007 -2010*. 2012. [En línea]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022433/CALIDADDELAIREWEB.pdf> ↑33
- [7] Instituto de Hidrología y Meteorología de Estudios Ambientales - IDEAM, *Informe de la calidad del aire en Colombia 2011-2015*. 2016. [En línea]. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe_del_Estado_de_la_Calidad_del_Aire_en_Colombia_2011_2015_vfinal.pdf ↑33
- [8] M. Caputo, M. Giménez and M. Schlamp, “Intercomparison of Atmospheric Dispersion Models”. *Atmos. Env.*, vol. 37, pp. 2435–2449, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00201-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00201-2) ↑33, 40
- [9] A. Zali, *et al.*, “Public Member Dose Assessment of Bushehr Nuclear Power Plant Under Normal Operation By Modeling The Fallout From Stack Using The HYSPLIT Atmospheric Dispersion Model”. *J. Env. Radioactiv.*, vol. 171, pp. 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.01.025> ↑33, 40, 43
- [10] United States Environmental Protection Agency, *Air Quality Dispersion Modeling - Preferred and Recommended Models*. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models> ↑33, 37
- [11] K. M. Longo, *et al.*, “The Chemistry CATT-BRAMS Model (CCATT-BRAMS 4.5): a Regional Atmospheric Model System For Integrated Air Quality and Weather Forecasting and Research”. *Geosci. Model Dev.*, vol. 6, pp. 1389-1405, 2013. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1389-2013> ↑33

- [12] Ministerio del Medio Ambiente, *Decreto 948 de 1995 por el cual se reglamenta parcialmente la ley 23 de 1973 en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire*. 1995. [En línea]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/54-dec.0948.1995.pdf> ↑33
- [13] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 601 de 2006 Por la cual se establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. 2006. [En línea]. Disponible en <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=19983> ↑33, 38, 43
- [14] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Resolución 610 del 2010 por la cual se modifica parcialmente la resolución 601 de 2006*. 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf> ↑33
- [15] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Resolución 909 de 2008 por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones*. 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/f0-Resoluci%C3%B3n%20909%20de%202008%20-%20Normas%20y%20est%C3%A1ndares%20de%20emisi%C3%B3n%20Fuentes%20fijas.pdf> ↑33, 38
- [16] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Resolución 1541 de 2013 por la cual se establecen niveles permisivos de la calidad del aire o de inmisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos y se dictan otras disposiciones*. 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/resoluciones/2013/res.1541.2013.pdf> ↑33
- [17] M. Mutahharah, H. Mimi and M. Rozainee, “Health Risk Assessment of Emissions from Acoal-Fired Power Plant Using AERMOD Modelling”. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, no. 5, pp. 476-485, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.05.008> ↑32, 33
- [18] D. Tartakovsky, E. Estern and D.M Broday, “Dispersion of TSP and PM10 Emissions from Quarries in Complex Terrain”. *Sci Total Environ*, vol. 15, no. 542A, pp. 946-954, 2015. ↑33, 35, 43, 44
- [19] L. Barreto, L. Uribe y N. Suárez, “Evaluación de la calidad del aire del Valle de Sogamoso, respecto a PM10 aplicando el modelo AERMOD como herramienta de planificación”. En *IV Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública Casap.*, Bogotá D.C., 2013, pp. 71-75 ↑33
- [20] A. Arrieta-Fuentes, “Dispersión de material particulado (pm10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos”. *Rev. Ing. Inv. Desarrollo.*, vol. 16, no. 2, pp. 43-54, 2016. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5445> ↑33, 40, 41
- [21] J. Huertas et al., “Air Quality Impact Assessment of Multiple Open Pit Coal Mines in Northern Colombia”. *J. Env. Manage.*, vol. 93, no. 1, pp. 121-129, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.08.007> ↑33
- [22] J.W. Cely, W.L. Siabato, A. H. Sánchez y A.P. Rangel, “Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental”. *Ingeniería*, vol. 7, no. 2, pp. 31- 38, 2002. ↑33
- [23] C.A. Riveros, M. Melgarejo, A. Riveros y L. Alvarado. “Sistema Difuso Evolutivo para la Predicción del Nivel de Contaminación del Aire por Material Particulado: Caso Puente Aranda (Bogotá)”. *Ingeniería*, vol. 17, no. 2, pp. 55 – 62, 2012. ↑33
- [24] A. Rincón and N. Rojas, “Aplicación exploratoria del sistema de modelación CCATT-BRAMS para la región metropolitana de Bogotá: representación preliminar de meteorología y de transporte”. En *IV Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública Casap.*, Bogotá D.C., 2013, pp. 962-980. ↑33
- [25] M.A. Rincón, *Simulación regional de contaminantes atmosféricos para la ciudad de Bogotá*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia, 2015. [En línea]. Disponible en: www.bdigital.unal.edu.co/51092/1/74189961.2015.pdf ↑33
- [26] University College London and Universidad de los Andes, Marco teórico de contaminación atmosférica en Colombia, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp-content/uploads/Caracterizaci%C3%B3n-de-la-contaminaci%C3%B3n-atmosf%C3%A9rica-en-Colombia1.pdf> ↑33, 34
- [27] D. García y M.L Chas Amil, “La contaminación de la industria de pasta-papel en Galicia: un análisis de flujos de materiales y energía”. *Estudios de Economía Aplicada*, vol. 18, no. 2, pp. 143-158, 2001. ↑34
- [28] A. Cruz y D.P. Perdomo, *Análisis de la competitividad en el sector industrial del papel, cartón y sus productos en Colombia durante el periodo comprendido entre 1997–2007*. Tesis de pregrado, Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, 2011. [En línea]. Disponible en:

- [http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/12488/T10.11 %20C889a.pdf?sequence=1](http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/12488/T10.11%20C889a.pdf?sequence=1) ↑34
- [29] M. Jaramillo, et al., “Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuentes puntuales en la zona Cali-Yumbo (Colombia)”. *Ingeniería y desarrollo*, vol. 17, pp. 115-129, 2005. ↑34
- [30] Universidad de los Andes, *Parte 2: Inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Fijas y Móviles*. 2009. [En línea]. Disponible en: <https://uniandes.edu.co/sites/default/files/asset/document/parte-2-inventario.pdf> ↑34
- [31] S. Saha, et al., “The NCEP Climate Forecast System Version 2”. *J. Climate.*, vol. 27, pp 2185 – 2208, 2014 <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1> ↑35
- [32] N. Gopaldaswami, K. Kakosimos, L.V Echot, T. Olewski, M.S Mannan, “Analysis of Meteorological Parameters for Dense Gas Dispersion Using Mesoscale Models”. *J Loss Prev Process Ind.*, vol. 35, no. 1, pp. 145-156, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.04.009> ↑38, 39, 40, 41, 43, 44
- [33] DAGMA, “Sistema de vigilancia de calidad del aire de Cali-SVCAC”. 2017. http://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/38365/sistema_de_vigilancia_de_calidad_del_aire_de_cali_svcac/ ↑38
- [34] J. Almorox, “Climatología aplicada a la Ingeniería y Medioambiente”. UNESCO FAO *Clasificación climática Open Course Ware de la Universidad Politécnica de Madrid*. 2015. [En línea]. Disponible en: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/clasificacionesclimaticas/unescoFAOclasificacionclimatica.pdf/view?searchterm=unesco> ↑39
- [35] Instituto de Hidrología y Meteorología de Estudios Ambientales, *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual a través de análisis de componentes principales*. 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21141/Regionalizaci%C3%B3n+de+la+Precipitaci%C3%B3n+Media+Mensual/1239c8b3-299d-4099-bf52-55a414557119> ↑39
- [36] J. Ortega, R. Sbarato and M. Sbarato, *Predicción y evaluación de impactos ambientales sobre la atmosfera*. Argentina, Encuentro Grupo Editor, Argentina, 2007, pp. 95-130 ↑39, 40
- [37] J. Robledo and B. Chávez, “Distribución de la precipitación en Colombia Analizada mediante conglomeración estadística”. *Cenicafe*, vol. 51, no. 2, pp. 102-113, 2000 ↑39
- [38] M. Kalhor and M. Bajoghli, “Comparison of AERMOD, ADMS and ISC3 for Incomplete Upper Air Meteorological Data (Case Study: Steel plant)”. *Atmos. Pollut. Res.*, in press, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.06.001> ↑40
- [39] A.H. Sanchez, W.L. Siabato and J.W. Cely, “Modelo de calidad del aire para Bogotá”. *Ingeniería*, vol. 7, no. 1, pp. 65 – 71, 2002. ↑40, 41
- [40] A. Triantafyllou and P. Triantafyllou, “Aspects of atmospheric flow and dispersion of air pollutants in a mountainous basin”. *Sci total environ.*, vol. 297, no. 3, pp. 85-103, 2006. ↑40, 41
- [41] M. Khandadakar and H. Moritomi, “Modeling of Atmospheric Dispersion of Mercury From Coal-Fired Power Plants in Japan”. *Atmos Pollut Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 226-237, 2012. <https://doi.org/10.5094/APR.2012.025> ↑41, 43

Oscar Andrés Vidal Daza

Cali, Colombia. Químico, Universidad Santiago de Cali. Grupo de investigación GIEMA. Facultad de Ciencias Básicas - Universidad Santiago de Cali. Cali, Colombia.
 Correo electrónico: oscarvidal75@hotmail.com

Andrea Pérez Vidal

Ingeniera Sanitaria, Universidad del Valle; magíster y doctora en Ingeniería con énfasis en Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle; docente dedicación exclusiva, grupo de Investigación en Ingeniería Electrónica, Industrial y Ambiental (GIEIAM). Universidad Santiago de Cali. Facultad de Ingeniería. Cali, Colombia.
 Correo electrónico: andrea.perez00@usc.edu.co