

**Revista Facultad Nacional
de Salud Pública**

Revista Facultad Nacional de Salud Pública

ISSN: 0120-386X

ISSN: 2256-3334

Universidad de Antioquia

Piñeros-Jiménez, Juan Gabriel; Franco, María Cristina; Montealegre-Hernández, Nora Adriana; Grisales-Vargas, Sara Catalina; Gutiérrez-Cano, Yeisson Alejandro; Grisales-Romero, Hugo

Distribución espacial de la morbimortalidad atribuible a la contaminación del aire por pm2.5 en Medellín (Colombia), 2010-20161

Revista Facultad Nacional de Salud Pública, vol. 40, núm. 2, 2022, Mayo-Agosto, pp. 1-16
Universidad de Antioquia

DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.e346589>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12075238006>

- ▶ [Cómo citar el artículo](#)
- ▶ [Número completo](#)
- ▶ [Más información del artículo](#)
- ▶ [Página de la revista en redalyc.org](#)

UDEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



Distribución espacial de la morbimortalidad atribuible a la contaminación del aire por $PM_{2.5}$ en Medellín (Colombia), 2010-2016*

Spatial distribution of morbidity and mortality attributable to $PM_{2.5}$ air pollution in Medellín (Colombia), 2010-2016

Distribuição espacial da morbimortalidade atribuível à poluição do ar por $PM_{2.5}$ em Medellín (Colômbia), 2010-2016

Juan Gabriel Piñeros-Jiménez¹; María Cristina Franco²; Nora Adriana Montealegre-Hernández³; Sara Catalina Grisales Vargas⁴; Yeisson Alejandro Gutiérrez Cano⁵; Hugo Grisales-Romero⁶

¹ Doctor en Salud Pública. Universidad de Antioquia, Colombia. juan.pineros@udea.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9944-5397>

² Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo. Fundación Grupo HTM, Colombia. mfranco@grupohm.org. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8474-4434>

³ Doctorado en Salud Pública. Universidad de Antioquia Colombia. nora.montealegre@udea.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5824-4030>

⁴ Magíster en Ingeniería Ambiental. Universidad de Antioquia, Colombia. sara.grisales@udea.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3237-0682>

⁵ Profesional en Gerencia en Sistemas de Información en Salud. Universidad de Antioquia, Colombia. yeisson.gutierrez@udea.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4900-9922>

⁶ Doctor en Epidemiología. Universidad de Antioquia, Colombia. hugo.grisales@udea.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5493-0009>

Recibido: 27/07/2021. Aprobado: 26/01/2022. Publicado: 02/03/2022

Piñeros-Jiménez JG, Franco MC, Montealegre-Hernández NA, Grisales-Vargas SC, Gutiérrez-Cano YA, Grisales-Romero HG. Distribución espacial de la morbimortalidad atribuible a la contaminación del aire por $pm_{2.5}$ en Medellín (Colombia), 2010-2016. Rev. Fac. Nac. Salud Pública. 2022;40(2):e346589. DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.e346589>

* Este texto es producto de la investigación “Determinación de la carga atribuible de enfermedad por contaminación del aire urbano y sus costos económicos para la ciudad de Medellín, 2010-2016”, aprobado por Minciencias en la convocatoria 744-2016, y financiado mediante contrato núm. 633-2017. La investigación finalizó en junio de 2021.

Resumen

Objetivo: Esta investigación buscó establecer la distribución espacial de la morbimortalidad atribuible a la contaminación del aire ambiental por materia particulada (*particulate matter* 2.5) (PM_{2.5}) en Medellín entre 2010 y 2016. **Métodos:** Se planteó un estudio ecológico. Se estandarizaron las direcciones de residencia de los pacientes atendidos y las defunciones por eventos de interés. Se emplearon mapas de calor, mediante el análisis de densidad de Kernel, por núcleos domiciliarios para áreas de 10 000 m². **Resultados:** Se encontraron 45 487 y 2743 casos y defunciones, respectivamente, atribuibles a la contaminación del aire ambiental por PM_{2.5} con datos de localización geográfica. La zona suroccidental de la ciudad presentó las mayores densidades de eventos atribuibles por

todas las causas estudiadas y por grupo de eventos, con algunas áreas pequeñas en otros lugares. Por su parte, la zona suroriental, con las mejores condiciones socioeconómicas, manifestó la menor concentración de eventos atribuibles. **Conclusión:** La información geocodificada de la morbimortalidad por núcleos domiciliarios permitió establecer la distribución de casos y muertes atribuibles a la contaminación ambiental del aire por PM_{2.5} en Medellín, con mayor concentración al suroccidente de la ciudad, lo que permite evidenciar la presencia de disparidades territoriales de este fenómeno.

-----*Palabras clave:* análisis espacial, contaminación del aire, Medellín (Colombia), morbilidad, mortalidad, sistemas de información geográfica.

Abstract

Objective: This research aimed to establish the spatial distribution of morbidity and mortality attributable to particulate matter (pm2.5) air pollution in Medellín between 2010 and 2016. **Methodology:** An ecological study was proposed. Addresses of patients treated and deceased due to events of interest were standardized. Heat maps were used, through Kernel density analysis per residential units for areas of 10,000 m². **Results:** 45,487 cases and 2,743 deaths attributable to pm2.5 air pollution with geographic location data were found. The southwestern area of the city presented the highest event densities attributable to all causes studied and by group of events, with some small areas in other places.

On the other hand, the southeastern area, with the best socio-economic conditions, showed the lowest concentration of attributable events. **Conclusion:** Geocoded information of morbidity and mortality by residential units made it possible to establish the distribution of cases and deaths attributable to pm2.5 air pollution in Medellín, with a greater concentration in the southwestern part of the city, which makes the presence of territorial disparities in this phenomenon observable.

----- *Keywords:* spatial analysis, air pollution, Medellín (Colombia), morbidity, mortality, geographic information systems.

Resumo

Objetivo: Esta pesquisa procurou estabelecer a distribuição espacial da morbimortalidade atribuível à poluição do ar ambiental por matéria particulada (*particulate matter* 2.5) (PM2.5) em Medellín entre 2010 e 2016. **Metodologia:** Propôs-se uma abordagem ecológica. Padronizaram-se os endereços de residência dos pacientes atendidos e as mortes por eventos de interesse. Empregaram-se mapas de calor, por meio da análise de densidade de Kernel, por núcleos domiciliários para áreas de 10000 m². **Resultados:** Acharam-se 45487 e 2743 casos e mortes, respectivamente, atribuíveis à poluição do ar ambiental por PM2.5 com dados de localização geográfica. A zona do sudoeste da cidade apresentou as maiores densidades de eventos atribuíveis por todas as

causas estudadas e por grupo de eventos, com algumas áreas pequenas em outros lugares. Por sua parte, a zona do sudeste, com as melhores condições socioeconômicas, manifestou a menor concentração de eventos atribuíveis. **Conclusão:** A informação geocodificada da morbimortalidade por núcleos domiciliários possibilitou estabelecer a distribuição de casos e mortes atribuíveis à poluição ambiental do ar por PM2.5 em Medellín, com maior concentração no sudoeste da cidade, o que permite evidenciar a presença de disparidades territoriais deste fenômeno

-----*Palavras-chave:* análise espacial, poluição do ar, Medellín (Colômbia), morbilidade, mortalidade, sistemas de informação geográfica.

Introducción

Los avances en el desarrollo de técnicas de análisis espacial y las iniciativas gubernamentales de datos abiertos han marcado un hito para la salud pública local y global, al posibilitar la integración de información de distintos sectores y disciplinas, y al reconocer el contexto o los entornos como un aspecto esencial para la investigación, la práctica eficaz en salud pública y el desarrollo de política pública [1].

Desde la década de los noventa del siglo xx, se han logrado avances importantes alrededor del mundo en la adquisición de datos geoespaciales altamente precisos y una base cartográfica digital, relevantes tanto para la investigación en salud y la comprensión de procesos epidemiológicos vinculados con la transmisión de agentes infecciosos, la distribución de la morbimortalidad y de las disparidades territoriales en salud, y la exposición a diversos factores de riesgo, así como para la planificación de acciones y gestiones en salud que requieren no solo mayor precisión en cuanto a sus escalas espacio-temporales, sino también definir su relación con territorios, comunidades e individuos [2,3]. La salud ambiental ha utilizado los sistemas de información geográfica (SIG) para realizar análisis de diferentes fenómenos en distintas escalas, que comprenden desde los cambios en la naturaleza, la cobertura terrestre y el clima del planeta, hasta la dispersión espacial de peligros ambientales, como los contaminantes del aire y el agua, y los agroquímicos [4,5].

En el caso de la contaminación del aire, los SIG han permitido mejorar la comprensión de las exposiciones de corto (días) y largo plazo (meses y años) a contaminantes específicos, como al material particulado atmosférico (*particulate matter*, PM) y a algunos contaminantes gaseosos de interés particular (ozono y dióxido de nitrógeno) [6], a partir de distintas escalas de medición (regional, municipal, barrial, unidades censales, etc.) [7] y del análisis de fuentes (industrias, parque automotor, incendios forestales, etc.) [8]. Para ello, diferentes métodos han sido empleados, como los modelos de dispersión, la interpolación entre sitios de monitoreo dispersos, los modelos de regresión de uso de la tierra, de optimización y de pluma de dispersión de línea o área, y modelos con base en imágenes satelitales [9].

De acuerdo con lo anterior, se ha avanzado en la geolocalización de los impactos en salud, mediante la identificación de eventos asociados a la contaminación del aire, el cálculo de la carga de enfermedad y de la mortalidad atribuibles por unidades espaciales a nivel urbano [6], la estimación de la magnitud del riesgo ambiental a diferentes escalas geográficas y la identifica-

ción de disparidades socioeconómicas y territoriales en salud vinculadas con este fenómeno [10].

En Colombia, se ha identificado la contaminación del aire como una de las principales preocupaciones para la salud pública ambiental, debido a sus impactos para la salud humana y los altos costos económicos, sociales y ambientales que genera. Según el Instituto Nacional de Salud (INS), el 13,9 % de las muertes por enfermedad isquémica del corazón y el 17,6 % por enfermedad pulmonar obstructiva crónica podían explicarse por este fenómeno [11]. En el país, se reconoce el carácter local del fenómeno epidemiológico de la contaminación del aire, que está relacionado con las condiciones topográficas, meteorológicas y ambientales propias de cada territorio, así como por procesos de exposición y susceptibilidad de individuos y comunidades, que son inherentes a las inequidades socioeconómicas y de salud locales [12].

En los últimos años, han sido publicados algunos trabajos que ofrecen evidencia sobre la distribución espacial del material particulado de diámetro menor a 2,5 micrones ($PM_{2,5}$) en Bogotá y Medellín, usando técnicas de interpolación espacial, con base en los datos de las redes de monitoreo de calidad del aire [13] y modelos de regresión geográfica ponderada [14]. Además, se ha establecido el impacto del transporte en la exposición de los ciudadanos a este contaminante según el lugar de residencia [15], y la presencia de agrupaciones espacio-temporales de cáncer infantil a nivel nacional [16] y su relación con fuentes industriales de contaminación en áreas metropolitanas [17].

La dinámica de crecimiento poblacional, el proceso de urbanización acentuado y la problemática de la contaminación del aire en la ciudad de Medellín han tenido efectos en la calidad de vida de sus pobladores. Existen diagnósticos recientes sobre los impactos en la salud asociados a la exposición de corto y largo plazo a contaminantes críticos (PM_{10} , $PM_{2,5}$ y ozono) [12], y acerca de la carga de la enfermedad local atribuible a la exposición a $PM_{2,5}$ [18]. Sin embargo, estos hallazgos dan cuenta de la situación de salud ambiental a una escala municipal, aunque falta ahondar en aspectos relacionados con la geolocalización de los impactos a pequeñas escalas (barrios o comunas) y con la identificación de patrones espaciales que permita el desarrollo de intervenciones focalizadas en los territorios y que fortalezca la vigilancia en salud ambiental.

En este sentido, este trabajo tuvo como objetivo establecer la distribución espacial de la morbimortalidad atribuible a la contaminación ambiental por $PM_{2,5}$ en Medellín, entre 2010 y 2016. Al ser un estudio pionero, sirve como referencia para guiar las intervenciones en salud pública ambiental desde una perspectiva ecológica en la ciudad.

Metodología

En este apartado, se describen los aspectos metodológicos más significativos llevados a cabo en esta investigación, incluidos el lugar de estudio, el tipo de estudio y la población de la que se ocupa el mismo; las fuentes de información, la evaluación de la calidad de esta, y los procedimientos tanto para la selección y la trazabilidad de eventos como para la atribución de pesos específicos por exposición al $PM_{2.5}$ ambiental. También se muestra la geolocalización de evento, los análisis de datos espaciales y las consideraciones éticas de la investigación tenidas en cuenta.

Lugar de estudio

El municipio de Medellín se encuentra ubicado en la región del Valle de Aburrá, en la zona centro-occidental de la cordillera de los Andes ($6^{\circ}13'55''$ norte, $75^{\circ}34'05''$ oeste), a 1495 metros sobre el nivel del mar. La ciudad cuenta con un área total 328 km^2 , de los cuales 110 km^2 corresponden a suelo urbano y 218 km^2 a suelo rural. El promedio de lluvia total anual es de 1685 mm, que varía según la temporada. La temperatura promedio es de $21,5^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa del aire varía durante el año entre 63 y 73 % [19].

Entre 2010 y 2016, el promedio de concentración diaria de $PM_{2.5}$ fue de $35,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un rango de valores de 13,6 a $123,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, presentándose promedios de contaminación ambiental por $PM_{2.5}$ más altos en los días de febrero y marzo de todos los años, particularmente en marzo de 2016 [1].

Para el año 2016, la ciudad contaba con 2 486 723 habitantes, 1 170 224 hombres y 1 316 499 mujeres. El 89,45 % de la población residía en suelo urbano [12].

Tipo de estudio y población

Se llevó a cabo un estudio descriptivo de tipo ecológico, donde la población de estudio fueron los registros de información de salud, registros de atención en los servicios de salud y registros de defunción de las poblaciones de las comunas de la ciudad de Medellín, que constituyeron la unidad de análisis.

Estas fuentes de información secundaria permitieron la geolocalización de la morbimortalidad atribuible a contaminación ambiental por $PM_{2.5}$ y la obtención de medidas agregadas que resumieran la problemática por agrupaciones geográficas.

Fuentes de información

Se utilizaron todos los datos disponibles en el Sistema Integrado de Información de la Protección Social sobre morbilidad y defunciones de la población residente en Medellín en el período de 2010 a 2016. Los registros de fallecidos se obtuvieron del módulo de defunciones del Registro Único de Afiliados del Sistema de Salud.

Para la morbilidad, se utilizaron los Registros Individuales de Prestación de Servicios de Salud (RIPS), de donde se obtuvo información relacionada con las visitas a los servicios de urgencias y médicos ambulatorios, y con hospitalizaciones. También se utilizaron datos individuales o personales, que corresponden al Registro de Identificación-Registro Civil, para la identificación de los registros individuales.

Todos estos datos fueron suministrados por la Secretaría de Salud de Medellín, previa firma de un acuerdo de confidencialidad (FO-TICS-053 de 2018), que comprometía el manejo de datos de acuerdo con lo estipulado en el artículo 4, “Principios para el tratamiento de datos personales”, de la Ley Estatutaria 1581 de 2012 de la República de Colombia [20], que dicta las disposiciones generales para la protección de datos personales.

Los registros suministrados estuvieron bajo custodia del Centro de Investigación de la Facultad Nacional de Salud Pública, quien solo permitió el acceso al investigador principal y al personal técnico encargado del proceso de anonimización para el análisis posterior.

En su estructura, tanto los RIPS como los registros de defunciones contaron con atributos como tipo y número de documento, sexo, edad, municipio de residencia, código de diagnóstico principal, causa básica de muerte y dirección de residencia, como variable trazadora para el proceso de estandarización que aportó la información necesaria para llevar a cabo, luego del análisis por áreas, la identificación espacial de las comunas con mayores volúmenes de registros de eventos.

Calidad de la información

A cada fuente de datos se le hizo una evaluación de calidad, considerando las dimensiones de completitud, consistencia, precisión, duplicación e integridad de los registros.

Respecto a las defunciones, se calculó el subregistro con el método de Preston y Coale, y se utilizó el método de distribución proporcional, propuesto por la Organización Panamericana de la Salud, para abordar posibles sesgos de información [21].

Los casos de los eventos de morbilidad relacionados con la calidad del aire que se consideraron en esta investigación no fue posible ajustarlos por subregistro mediante la estrategia de muestreo por captura-recaptura, debido a que no se tuvieron dos fuentes de información con un identificador único que permitiera estimar el número no captado por dichas fuentes, en el sistema de notificación, y la sensibilidad del registro.

Selección y trazabilidad de eventos del estudio

Se incluyeron los registros cuya causa básica de muerte o diagnóstico médico principal fueron eventos respiratorios y circulatorios relacionados con la contaminación del aire por $PM_{2.5}$, según una revisión

exhaustiva de la literatura [12,18,22] que se realizó para la identificación de eventos.

De acuerdo con la Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades y Problemas Relacionados con la Salud (CIE-10) [23], los eventos respiratorios seleccionados fueron: infecciones agudas del tracto respiratorio inferior (J20-J22), enfermedades crónicas del tracto respiratorio inferior (J40-J47) y neoplasias malignas de órganos respiratorios e intratorácicos (C30-C39). También se consideraron los siguientes eventos circulatorios: cardiopatía isquémica (I20-I25) y enfermedades cerebrovasculares (I60-I69).

Mediante un procedimiento de trazabilidad que ha sido previamente descrito en la investigación que se reporta en [18], se identificaron los casos prevalentes en cada año de estudio. La estrategia se estableció según si correspondía a un evento de tipo agudo o a uno de tipo crónico, con base en la historia natural de la enfermedad, y consideró que un paciente pudo ser observado en los tres servicios (consulta externa, urgencias y hospitalización) durante una misma atención.

Para los eventos respiratorios de tipo agudo, se definió como caso el primer registro observado asociado con un individuo, y como atención complementaria, todos los registros observados posteriores cuya fecha de ocurrencia estuviese dentro de un periodo de 15 días.

Los eventos circulatorios de tipo agudo se seleccionaron a partir de la primera atención que cada individuo recibió por un evento específico y se asociaron a este todas las atenciones complementarias durante un periodo de 30 días. Mientras, para los eventos de tipo crónico, se asumió como caso la primera atención observada por paciente por cada evento durante el periodo de estudio.

Morbimortalidad atribuible a la contaminación del aire

Las magnitudes de la morbilidad y la mortalidad atribuibles a la exposición a contaminación ambiental por $PM_{2.5}$ se calcularon teniendo en cuenta las fracciones atribuibles poblacionales (FAP) a este factor de riesgo para cada grupo de eventos estudiados. Estas fracciones se establecieron con base en los estudios de carga global de la enfermedad, efectuados por el Instituto de Métricas y Evaluaciones en Salud de la Universidad de Washington [22].

Se calcularon las FAP para 6 causas específicas, tomando en cuenta el metaanálisis realizado por el estudio de carga global de la enfermedad, el cual estimó para Colombia el riesgo relativo y calculó las correspondientes funciones de exposición-respuesta integradas para $PM_{2.5}$, a partir de concentraciones mínimas entre 2,4 y 5,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Geolocalización de eventos atribuibles a la contaminación del aire

El proceso metodológico de geolocalización partió de la dirección de residencia de cada uno de los casos identi-

ficados en las atenciones en salud y los certificados de defunción. Todos los casos ubicados en el suelo urbano fueron estandarizados con fundamento en las bases de datos de las empresas promotoras de salud y de las empresas administradoras de planes de beneficios, con información consolidada, especialmente con la variable trazadora —la residencia—, para el año 2016. Este atributo fue asociado a los registros de todos los años de estudio, bajo el supuesto de no movilidad.

Las direcciones de residencia fueron estandarizadas de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Se identificaron los patrones de texto en los datos dirección, con el *software* lector EmEditor v19.2.1® (Emurasoft Inc., Redmond, Washington, Estados Unidos).
2. Con la información de Catastro Municipal actualizada a 2017, se estableció la composición del texto de la dirección de residencia, por medio de ocho caracteres de tipo alfanumérico.
3. Mediante la identificación de 329 patrones de nomenclatura, se estructuró la dirección de residencia como una variable geoespacial.
4. Con el *software* gestor de base de datos pgAdmin 4 v2.1® (The pgAdmin Development Team, varios lugares), se consolidó la información para el análisis geoespacial.
5. Para la geolocalización de la morbilidad atribuible a la contaminación atmosférica por $PM_{2.5}$, se utilizó la información cartográfica de núcleos domiciliarios disponible en Catastro de la Alcaldía de Medellín, que sirvió para geolocalizar cada caso prevalente, a partir de la dirección estandarizada.

Análisis de datos

Se hizo un análisis descriptivo, con base en el número de eventos prevalentes de morbilidad y mortalidad atribuibles. Los registros geocodificados se integraron a la capa de núcleos domiciliarios, y se generaron mapas de calor, para asignar el mayor peso a los núcleos que presentaban mayor de número de eventos.

Para cada año de estudio, la densidad espacial se calculó mediante análisis de densidad de Kernel para píxeles de 100 m \times 100 m, y simulando una cuadra urbanística con el *software* ArcGis® Desktop 10.6. (Environmental Systems Research Institute, Redlands, California, Estados Unidos), los píxeles se clasificaron con el método de intervalos equivalentes, que generan rangos del mismo tamaño.

Finalmente, se obtuvieron las salidas cartográficas correspondientes para la zona urbana del municipio de Medellín.

Consideraciones éticas

Este proyecto fue aprobado por el Comité de Ética de la Facultad Nacional de Salud Pública de la Universidad de Antioquia, según Acta 141 del 29 de abril de 2016.

Los procedimientos realizados en este proyecto siguieron los estándares contemplados en la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia [24], y los lineamientos éticos internacionales para la investigación relacionada con la salud con participación de seres humanos de 2016, del Consejo de Organizaciones Internacionales de Ciencias Médicas [25].

Este estudio utilizó datos anonimizados, que contaron con la autorización de cada una de las fuentes encargadas de su custodia, con quienes se firmaron los respectivos acuerdos de confidencialidad como medida para asegurar los principios del *habeas data*.

Resultados

Entre 2010 y 2016, se encontraron 567 505 casos de eventos asociados a la contaminación del aire y 28 079 defunciones, de los cuales el 52,57 y el 72,39 % respectivamente, presentaron datos de dirección de residencia que facilitaron su estructuración y localización en los núcleos domiciliarios identificados en la cartografía de la ciudad.

Los registros de morbilidad se distribuyeron en 5 grupos de eventos; de estos, entre el 18,20 y el 53,75 % tuvieron datos que permitieron realizar el proceso de

geolocalización. El 15,25 % de los 298 249 de registros localizables fueron atribuibles a la exposición a la contaminación ambiental por $PM_{2,5}$; de ellos, el 96,00 % ($n = 43 666$) correspondieron a eventos respiratorios, principalmente infecciones agudas del tracto respiratorio inferior ($n = 32 330$).

Entre los eventos circulatorios, la cardiopatía isquémica tuvo la mayor frecuencia de casos atribuibles a $PM_{2,5}$ con datos de localización ($n = 933$).

La Tabla 1 resume la distribución de los eventos de estudio.

Del total de defunciones reportadas entre los grupos de estudio ($n = 28 079$), solo se tuvo la dirección de residencia de 20 324. Después de la aplicación de la FAP de cada grupo diagnóstico, el número de defunciones atribuibles geolocalizados ascendió a 2743, de las cuales el 41 % correspondió a eventos del grupo de neoplasias malignas de órganos respiratorios e intratorácicos, y el 27,4 %, a cardiopatía isquémica.

Análisis espacial de la morbilidad atribuible

El análisis espacial evidenció que para el periodo comprendido entre 2010 y 2016, la mayor concentración de casos atribuibles a $PM_{2,5}$ se presentó en la comuna de

Tabla 1. Eventos atribuibles a la contaminación ambiental por $PM_{2,5}$, geolocalizados en Medellín según grupo diagnóstico, 2010-2016

Eventos (código CIE-10)	Casos	Casos con GD* (%)	FAP†	Casos atribuibles con GD	Muertes	Muertes con GD (%)	FAP	Muertes atribuibles con GD
Infecciones agudas del tracto respiratorio inferior (J20-J22)	395 761	212 703 (53,75 %)	0,152	32 330	2658	1870 (70,35 %)	0,091	170
Enfermedades crónicas del tracto respiratorio inferior (J40-J47)	132 588	69 977 (52,78 %)	0,162	11 336	3703	2754 (74,37 %)	0,106	292
Neoplasias malignas de órganos respiratorios e intratorácicos (C30-C39)	6059	1103 (18,20 %)	0,105	115	11 558	8557 (74,04 %)	0,131	1124
Cardiopatía isquémica (I20-I25)	12 910	6574 (50,92 %)	0,142	933	6307	4476 (70,97 %)	0,168	752
Enfermedades cerebrovasculares (I60-I69)	20 187	7892 (39,09 %)	0,098	773	3853	2667 (69,22 %)	0,152	405
Total	567 505	298 249 (52,55 %)		45 487	28 079	20 324 (72,38 %)		2743

* GD: Geodato.

† FAP: Fracción atribuible poblacional.

Belén, al suroccidente de la ciudad, además de una pequeña área con concentración moderada de casos en los barrios ubicados en la zona centro-oriental. Este patrón espacial fue constante tanto en el análisis anual como en el periodo de estudio (véase Figura 1).

Como se ilustra en la Figura 2, la distribución de casos de morbilidad atribuible de los diferentes grupos de eventos respiratorios y circulatorios estudiados manifestó patrones similares, caracterizados por una mayor densidad de casos en los barrios de la zona surocci-

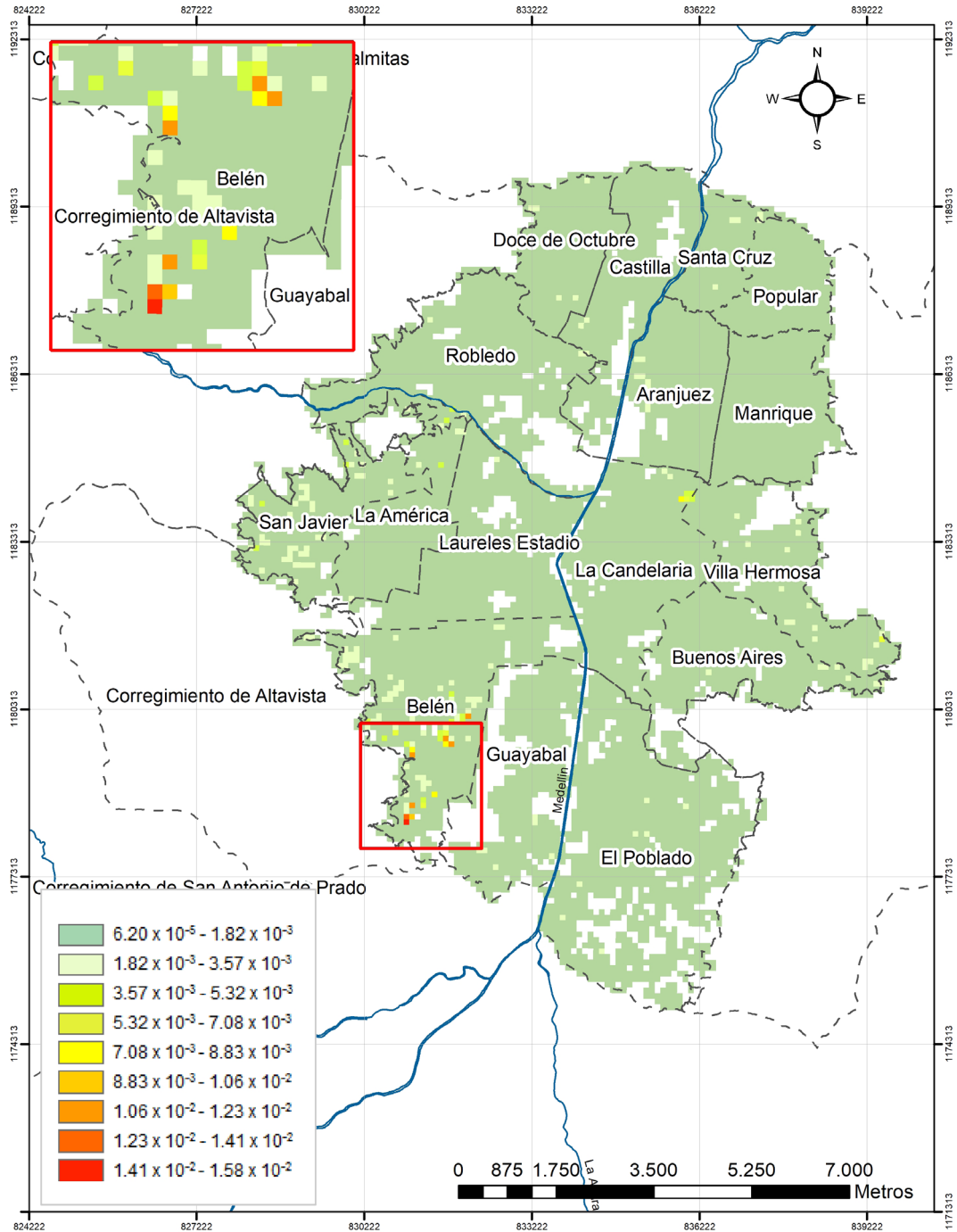


Figura 1. Distribución de los casos atribuibles a la contaminación ambiental por $PM_{2.5}$ en el área urbana de Medellín, para el periodo 2010-2016 (densidad de Kernel, número de registros por cada 10 000 m²).

Fuente: Registros Individuales de Prestación de Servicios - Secretaría de Salud de Medellín.

dental y una pequeña área en el centro-oriente, con una menor concentración al suroriente de la ciudad y en la franja adyacente al río Medellín. En el resto de la ciudad, la distribución anual fue más o menos homogénea (véase Figura 3).

Según los mapas de calor para la mortalidad atribuible a la contaminación por $PM_{2.5}$, se observó un comportamiento homogéneo de la distribución de casos para el acumulado de evento, aunque, como se muestra en la Figura 4, en la zona suroccidental de la ciudad, se presentó

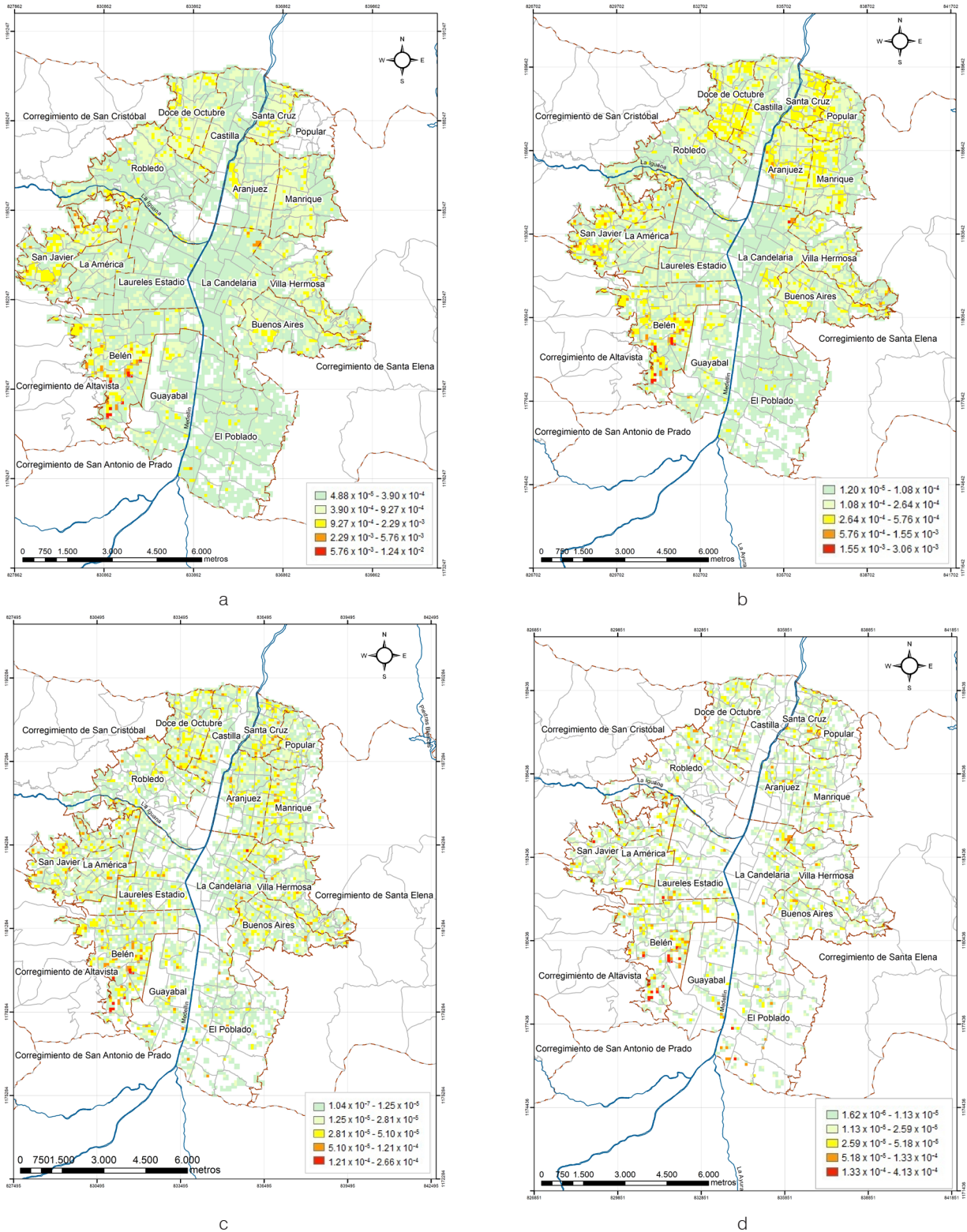


Figura 2. Distribución de casos atribuibles a la contaminación ambiental por $PM_{2.5}$, según grupo diagnóstico en Medellín, 2010-2016 (densidad de Kernel, número de registros por cada 10 000 m²). a. Infección aguda del tracto respiratorio (J20-J22); b. enfermedades crónicas del tracto respiratorio inferior (J40-J47); c. cardiopatía isquémica (I20-I25), y d. enfermedades cerebrovasculares (I60-I69).

Fuente: Registros Individuales de Prestación de Servicios - Secretaría de Salud de Medellín.

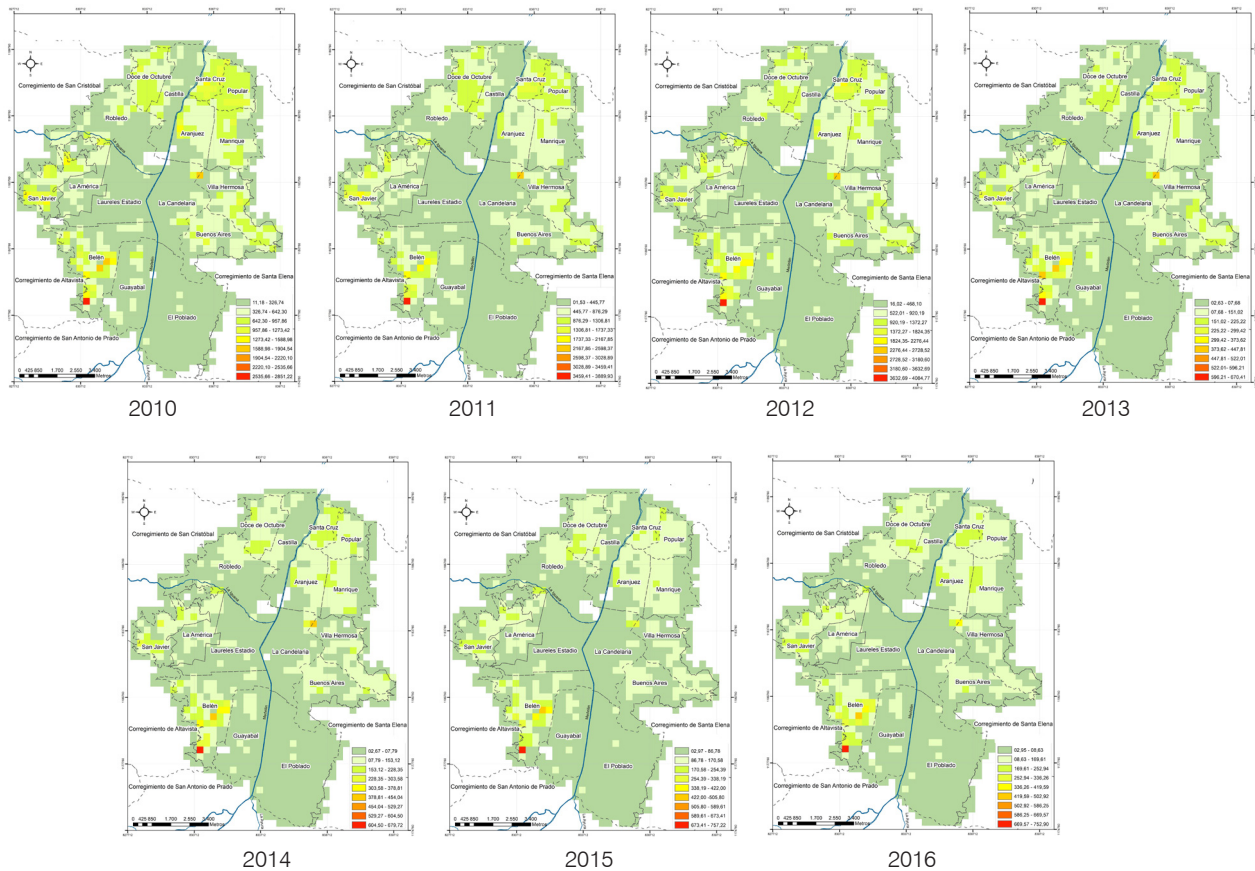


Figura 3. Mapa de calor de la distribución anual de los casos atribuible a la contaminación ambiental por $PM_{2.5}$ en el área urbana de Medellín (Densidad de Kernel por cada 300 m²)

Fuente: Registros Individuales de Prestación de Servicios- Secretarías de Salud de Medellín.

un área de mayor concentración del número defunciones atribuibles. Los análisis de mapas de calor para cada año de estudio expusieron el incremento de áreas de mayor densidad de mortalidad en esta zona y la concentración de defunciones atribuibles en 2015 y 2016 en la margen oriental de la comuna La Candelaria (Figura 5).

Un análisis más detallado de la mortalidad atribuible a la contaminación ambiental por $PM_{2.5}$ por grupos de eventos mostró que la distribución espacial de las defunciones, además de concentrarse en la comuna de Belén, también presentó algunos focos puntuales en las comunas del centro-oriente, el centro-occidente y el suroriente de la ciudad, como puede observarse en la Figura 6. Se destacó la mayor presencia de áreas de menor concentración de defunciones atribuibles en la zona suroriental, en la comuna El Poblado.

Discusión

El interés en utilizar métodos geográficos para el seguimiento de la salud ha crecido fuertemente en el mundo

en las últimas dos décadas. A través de estos métodos, el análisis y la visualización de datos sobre la salud pueden ser más enfocados y específicos para grupos y territorios objetivo [1,3]. La aplicación de estos métodos en los procesos de vigilancia de la salud es posible principalmente debido a capacidades técnicas más amplias y a más conjuntos de datos disponibles, lo cual ha permitido el diseño de intervenciones en salud con enfoque diferencial, y la integración de distintas disciplinas, como la epidemiología, la estadística, los sistemas de información en salud, la geografía, entre otras.

La contaminación del aire es una de las problemáticas de mayor prioridad en el mundo [26] y como tal amerita avanzar en los procesos de generación de nuevo conocimiento, con la menor incertidumbre posible y con herramientas que ayuden a tomar decisiones en diferentes escalas territoriales [27]. En Colombia, se ha avanzado de manera importante en la comprensión de este fenómeno, al lograr la medición de contaminantes criterio (principalmente $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO , NO_2 y NO_x), el análisis de su dispersión espacio-temporal [28] y de sus fuentes a

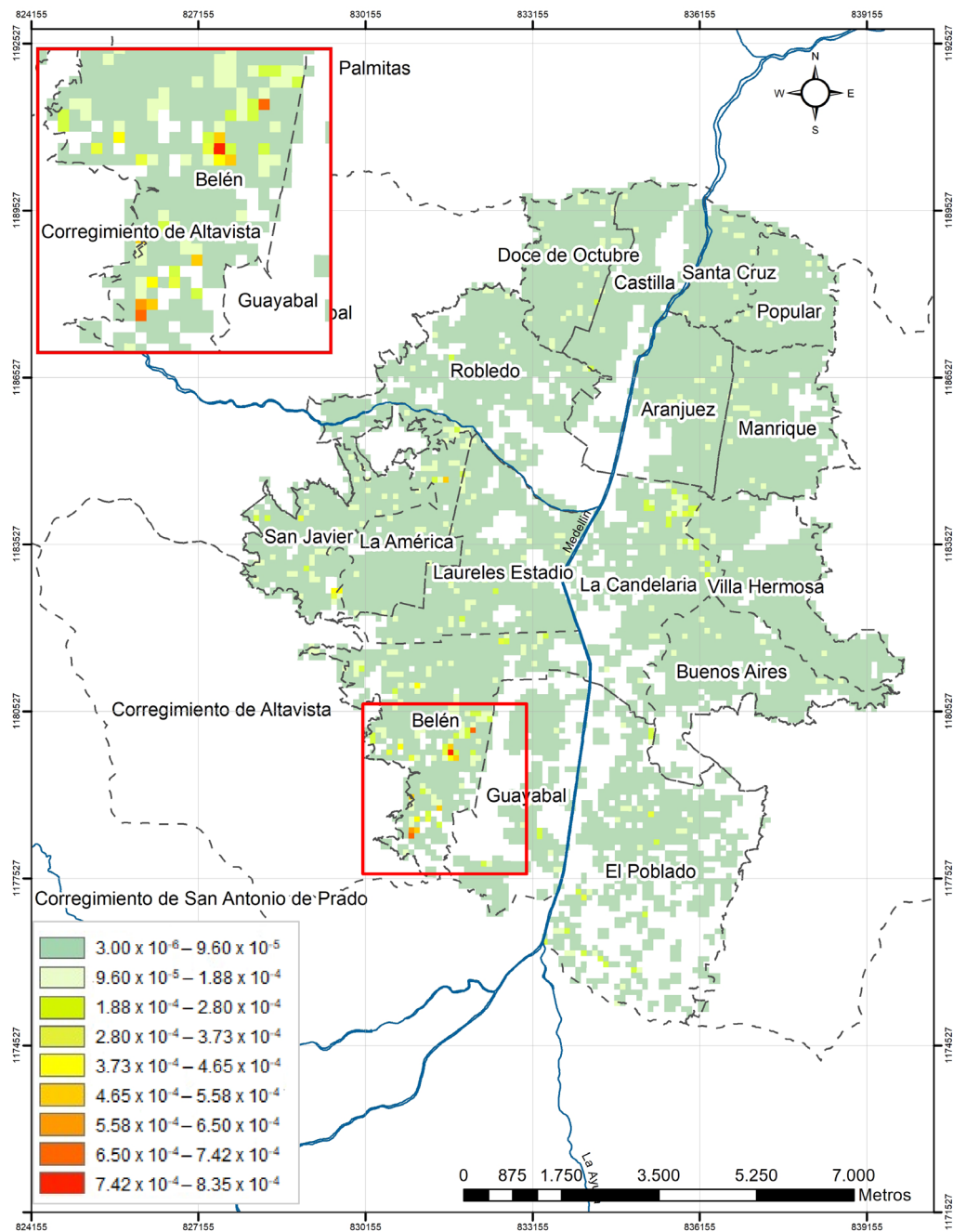


Figura 4. Distribución de las defunciones atribuible a la contaminación ambiental por $PM_{2.5}$ en el área urbana de Medellín, para el periodo 2010-2016 (densidad de Kernel, número de registros por cada 10 000 m²).

Fuente: Registros Único de Afiliados Modelo de Defunciones - Secretaría de Salud de Medellín.

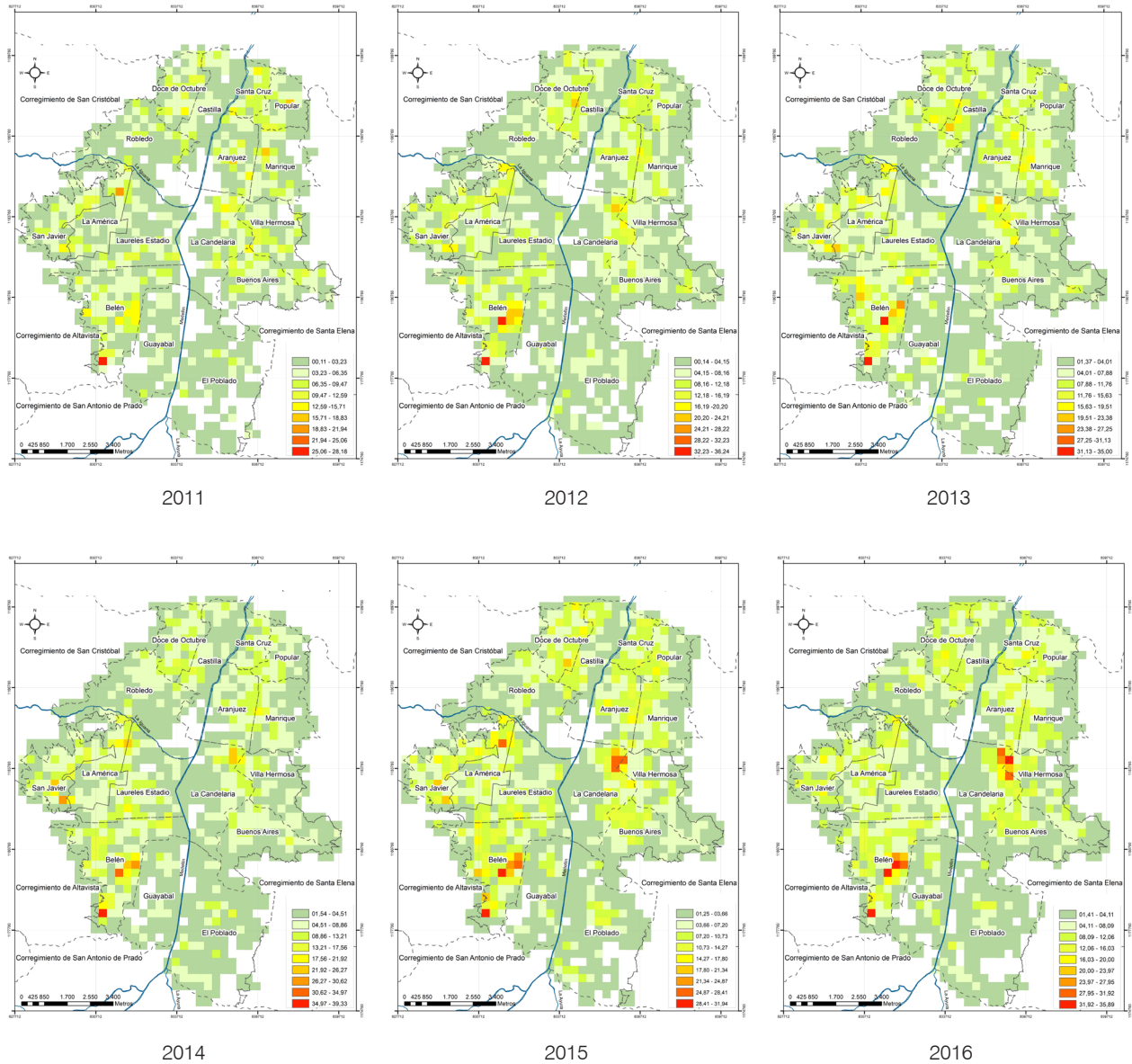


Figura 5. Mapa de calor de la distribución anual de las defunciones atribuible a la contaminación ambiental por $PM_{2.5}$ en el área urbana de Medellín (Densidad de Kernel por cada 300 m²)

Fuente: Registros Individuales de Prestación de Servicios- Secretarías de Salud de Medellín.

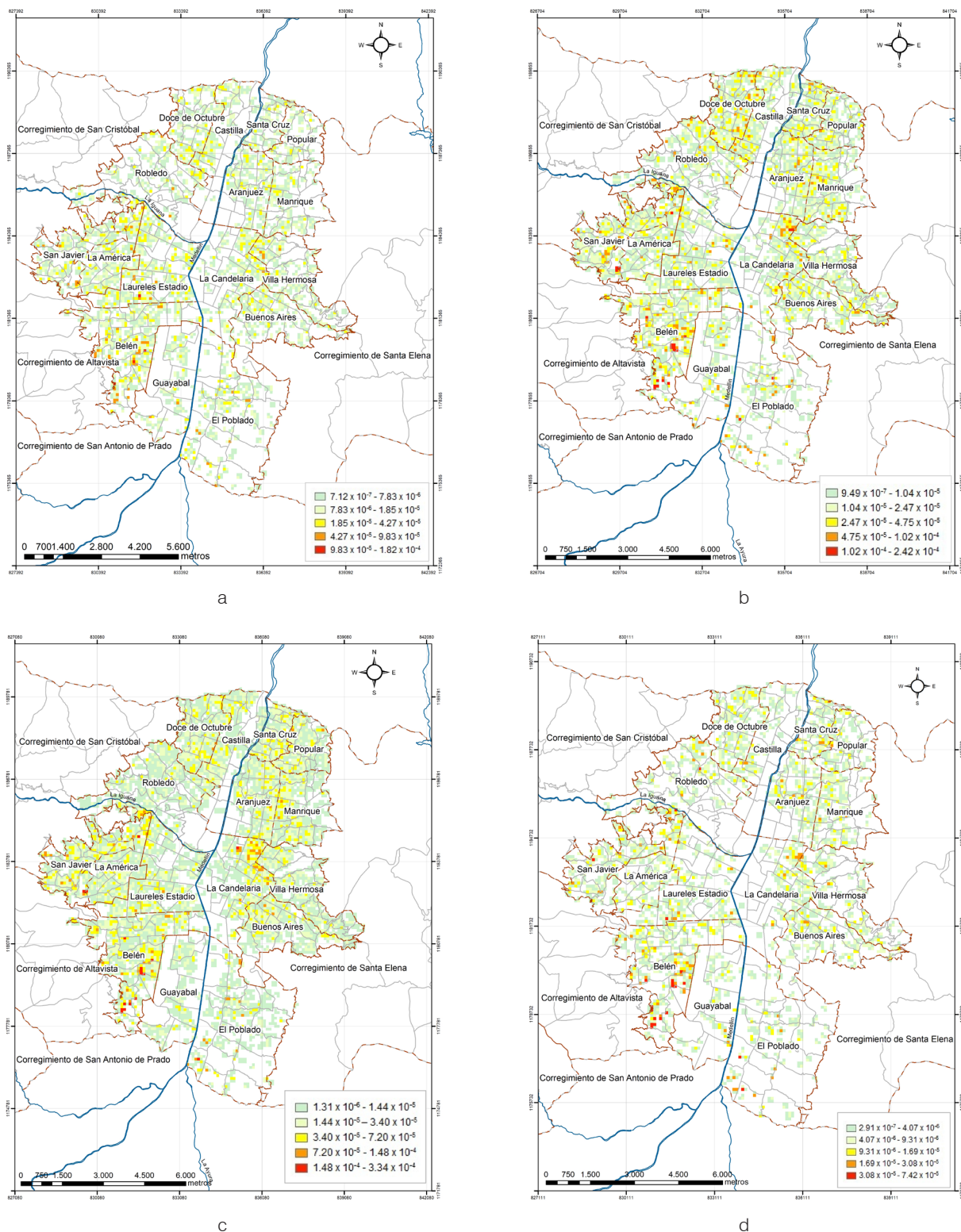


Figura 6. Distribución de defunciones atribuibles a la contaminación ambiental por PM_{2.5} según grupo diagnóstico en Medellín, 2010-2016 (densidad de Kernel, número de registros por cada 10 000 m²). a. Infección aguda del tracto respiratorio (J20-J22); b. enfermedades crónicas del tracto respiratorio inferior (J40-J47); c. cardiopatía isquémica (I20-I25), y d. enfermedades cerebrovasculares (I60-I69).

Fuente: Registros Único de Afiliados Modelo de Defunciones - Secretaría de Salud de Medellín.

escalas regionales y locales [29]. También se han podido lograr algunos avances en establecer los procesos de exposición de las comunidades a los contaminantes criterios y medir sus impactos en salud, aunque con un grado de incertidumbre importante, dada la escala poblacional de la determinación del proceso [30]. Recientemente, se ha podido establecer la carga de la enfermedad atribuible a la contaminación del aire a nivel nacional [11], y a nivel local, para la ciudad de Medellín [18].

Se reconoce que esta problemática está influenciada por las condiciones geográficas locales, y que, en el caso de la ciudad de Medellín, hacen del fenómeno epidemiológico asociado a la contaminación un caso singular en el país, por el favorecimiento que existe en la concentración de niveles altos de contaminantes atmosféricos en general y de $PM_{2.5}$ en particular, que, con frecuencia, sobrepasa las normas expresadas en las guías de calidad del aire [12].

Nuestro estudio expone la distribución geográfica de los casos de morbilidad y de mortalidad atribuibles a la contaminación ambiental por $PM_{2.5}$ en la ciudad de Medellín, con la finalidad de analizar, desde una perspectiva espacio-temporal, la información disponible en el territorio. Para ello, se utilizaron estrategias de los SIG, que se han convertido en un *boom* tecnológico en la disciplina ambiental, dado que permiten identificar áreas que, a través del tiempo, presentan mayores concentraciones de los eventos de salud y los riesgos asociados en especial al $PM_{2.5}$, y con ello, visibilizar la localización de los efectos de estos en la salud de la población.

Aunque existen antecedentes de estudios en Colombia que han llevado a cabo análisis espaciales de los eventos relacionados con los contaminantes del aire y sus fuentes, como el caso de Valbuena-García *et al.* [17], que observaron la relación entre casos incidentes de cáncer infantil y la proximidad a fuentes industriales de contaminación del aire, y de Rodríguez-Camargo *et al.* [13], quienes predijeron para Bogotá el incremento en el porcentaje de mortalidad cardiopulmonar en el corto y largo plazo en las zonas con mayor concentración $PM_{2.5}$, nuestro estudio es el primero a nivel nacional que analiza espacialmente la morbilidad atribuible a la contaminación ambiental por este contaminante.

La investigación partió de establecer los casos prevalentes y las defunciones atribuibles a la contaminación ambiental por $PM_{2.5}$, los cuales presentaron porcentajes de atribución coherentes con los encontrados en estudios nacionales, como el estudio de carga de enfermedad ambiental en Colombia, realizado por el INS [11], así como una distribución de casos y defunciones por grupos de eventos comparable con el estudio de INS y de otros estudios internacionales [31], lo que indica una línea de base epidemiológica plausible para el proceso de geolocalización.

Se destacó que tanto para las muertes como para los casos atribuibles a $PM_{2.5}$ y geolocalizados, la mayor concentración anual —de periodo y por grupo diagnóstico— se encontró en la comuna de Belén. Esta está ubicada al suroccidente de la ciudad, una zona donde, en el entorno periurbano, predominan procesos extractivos y de producción de arena, arcilla y minería, que se reconocen como fuentes locales de contaminación del aire. Estos procesos, además de deteriorar la calidad de vida de sus habitantes, generan impactos en la red vial, por el tránsito de vehículos de transporte de materiales de extracción y procesamiento, con el consecuente incremento de las partículas suspendidas en el aire [32]. Existe evidencia sobre el aumento de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en las áreas adyacentes a zonas de cantera [33]; así mismo, se han documentado los efectos sobre la salud de la exposición al polvo de este tipo de fuente, que incluyen cambios en los parámetros de función pulmonar, compatibles con restricción de las vías respiratorias [34].

También se destacaron algunas zonas de concentración de eventos más puntuales, como fue el de la morbilidad atribuible a la contaminación por $PM_{2.5}$ en el centro oriente de la ciudad (comuna La Candelaria), y más dispersa, en el caso de la mortalidad atribuible en centro oriente, nororiental, noroccidente y occidente de la ciudad. En estos espacios, esta distribución de eventos puede explicarse por el alto flujo vehicular en estos sectores y con alta densidad poblacional.

En el caso de la mortalidad, la dispersión de áreas de concentración de defunciones se manifestó de manera importante en los años 2015 y 2016, años en los que se produjeron episodios críticos de contaminación por $PM_{2.5}$ en la ciudad, durante los meses de febrero y marzo, acompañados de incrementos en los riesgos de morbilidad y mortalidad en la ciudad [12]. Así mismo, se identificaron zonas de menor concentración de casos atribuibles a la exposición a $PM_{2.5}$ que de forma constante se presentaron en la zona suroccidental (comuna El Poblado), donde se hallan los estratos socioeconómicos más altos de la ciudad.

Esta exploración permite formular la hipótesis de la existencia de un comportamiento desigual en la distribución de los impactos en salud derivados de la contaminación del aire en Medellín, que da cuenta de un proceso de injusticia ambiental, por la no garantía de un medio ambiente sano para los ciudadanos de algunos territorios de la ciudad, donde se concentran procesos productivos que generan una explotación indiscriminada de los recursos minerales, que ha sido permanente durante las últimas décadas [12]. Nuestros hallazgos se suman a la evidencia de varios estudios empíricos acerca de la justicia ambiental, que analizan las disparidades en la exposición al material particulado y la susceptibilidad poblacional. Estos estudios demuestran que, en el ámbito intraurbano, las minorías étnicas, las comunidades de

bajos ingresos y los vecindarios más desfavorecidos se exponen de manera desproporcionada a aquellos factores y sufren sus impactos en salud [35-38].

Para el proceso de geolocalización, se partió de la selección de los eventos que han sido ampliamente estudiados en relación con la contaminación del aire [12], en los que se ha podido establecer la FAP y los procesos fisiopatológicos involucrados [22].

Ante la ausencia de estudios locales acerca del riesgo relativo asociado a la exposición a $PM_{2.5}$ en nuestro territorio, para calcular la fracción de riesgo atribuible, decidimos utilizar los datos de FAP derivados de metaanálisis y utilizados en los estudios de carga global de la enfermedad [22], que aunque pueden introducir sesgos, por la extrapolación de hallazgos de otra ubicación, nos permiten una aproximación más cercana al fenómeno en la ciudad.

Este estudio reconoce sus limitaciones, y a pesar de sus novedosos resultados, hay que analizarlos con cautela. Es conocido que las cifras absolutas no admiten comparaciones de ninguna naturaleza, situación debida a la imposibilidad de calcular las tasas de prevalencia y de mortalidad para unidades territoriales de menor tamaño como las comunas, ya que la geolocalización de todos los casos y muertes atribuibles fue imposible. Así mismo, en el caso de la morbilidad, debe considerarse el alto subregistro de los RIPS, que a nivel nacional se calcula entre el 34 y el 50 %, lo cual afecta la estimación de las prevalencias de los eventos a nivel municipal y sobre todo en unidades territoriales más pequeñas [39]. El subregistro tiende a ser mayor en zonas rurales y hospitales pequeños, escenario diametralmente opuesto al de Medellín, a cuyo sistema de salud se le reconocen avances en la oportunidad de la información durante la última década.

El estudio utilizó un protocolo de estandarización de las direcciones, lo que permitió la geolocalización de los casos y las defunciones atribuibles con mayor exactitud y confiabilidad. Aunque se ha evidenciado la alta calidad de los datos de mortalidad y de los registros de morbilidad utilizados [40], se reconoce la existencia de problemas para la identificación de la dirección de los casos prevalentes y las defunciones, que tiene que ver con el diligenciamiento incompleto, el uso de la dirección del sitio de atención en lugar del sitio de residencia, entre otros. Esta situación de poca disponibilidad de datos de geolocalización introduce un potencial sesgo de información [41] en el análisis de este estudio y que debe ser considerado en la interpretación de los resultados, sobre todo para eventos de poca prevalencia. Sin embargo, a pesar de las diferencias marcadas entre los porcentajes de disponibilidad de estos datos, se reconoce un patrón en la distribución espacial de los distintos grupos de eventos.

Otra limitación en el análisis de la geolocalización tiene que ver con el supuesto de inmovilidad de la población, que se asumió cuando se estableció la dirección de

residencia de 2016 como la dirección del periodo. Esta situación introdujo un potencial sesgo de selección; sin embargo, se debe recordar que, al ser un estudio cuya base son las fuentes secundarias, el análisis se supeditó a la información disponible. Esta situación es comúnmente reconocida en los estudios de tipo ecológico [41].

El control de los contaminantes del aire en Medellín podría reducir el número de muertes anuales y los eventos de morbilidad, que pueden incrementar los costos asociados a la atención sanitaria. Los resultados de este estudio permiten inferir que la carga de morbilidad y mortalidad por este factor de riesgo son geográficamente específicos, y que las autoridades locales deberían fortalecer capacidades de análisis geoespacial para comprender territorialmente este problema y gestionar un abordaje eficaz, como se promueve en los planes estratégicos locales [42].

Este estudio tuvo como objetivo describir la distribución espacial de la morbimortalidad atribuible a la contaminación por $PM_{2.5}$, en Medellín, entre 2010 y 2016, a partir de la estimación del número de casos y defunciones, útiles para priorizar la política para reducir y prevenir los efectos adversos para la salud en la ciudad.

Conclusión

Con el proceso de estandarización de las direcciones de residencia para los datos de salud, se logró la geolocalización de 318 573 registros entre morbilidad y defunciones, equivalente al 56,14 % del total de los registros identificados como eventos relacionados con la contaminación atmosférica, de los cuales 48 230 correspondieron a eventos atribuibles a la exposición a contaminación ambiental por $PM_{2.5}$.

El análisis espacial permitió establecer que la comuna de Belén, al suroccidente de la ciudad, presentó la mayor concentración de casos y defunciones atribuibles a la contaminación por $PM_{2.5}$. Así mismo, la comuna El Poblado, al suroriente, tuvo la menor concentración de eventos.

Contar con información de morbimortalidad geocodificada por núcleos domiciliarios permite determinar relaciones que contribuyen a identificar la magnitud de los eventos y prever disparidades territoriales, lo que facilita la priorización de intervenciones en salud ambiental.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Salud de Medellín por permitirnos acceder a la información de morbilidad y mortalidad, la autoridad ambiental local y al equipo de profesionales que acompañó el proyecto en la Facultad Nacional de Salud Pública de la Universidad de Antioquia, especialmente el Gerente de Sistema de Información Dorian Ospina, quien colaboró con el análisis

de trazabilidad de eventos y la elaboración del protocolo para el análisis de calidad de los datos.

Fuente de financiación

Este estudio fue financiado por Minciencias, contrato 633-2017.

Conflictos de intereses

Los autores no tienen ningún conflicto de interés para declarar.

Declaración de responsabilidad

Los puntos de vista expresados en el manuscrito son exclusivos de los autores y no de la institución en la que trabajan o de la fuente de financiación.

Declaración de contribución por autores

Juan Gabriel Piñeros: concepción del proyecto, diseño de la metodología, escritura del artículo y aprobación de la versión final del mismo.

María Cristina Franco: estructuración de datos espaciales, geocodificación de la información, generación de salidas gráficas, aportes en la escritura del artículo.

Nora Adriana Montealegre: concepción del proyecto, diseño de la metodología, escritura del artículo y aprobación de la versión final del mismo.

Sara Catalina Grisales: apoyo en la planeación, gestión y estructuración de la información espacial, aportes a la escritura del artículo.

Yeisson Alejandro Gutiérrez: gestión y estructuración de datos, escritura del artículo.

Hugo Grisales: concepción del proyecto, diseño de la metodología, escritura del artículo y aprobación de la versión final del mismo.

Referencias

- Mullner RM, Chung K, et al. Introduction: Geographic information systems in public health and medicine. *J Med Syst*. 2004;28(3):215-21. doi: <https://doi.org/10.1023/B:JOMS.0000032972.29060.dd>
- Richardson DB, Volkow ND, Kwan MP, et al. Spatial turn in health research. *Science*. 2013;339(6126):1390-2. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1232257>
- Wang F. Why public health needs GIS: A methodological overview. *Ann GIS*. 2020;26(1):1-12. doi: <https://doi.org/10.1080/19475683.2019.1702099>
- Fadadu RP, Balmes JR, Holm SM. Differences in the estimation of wildfire-associated air pollution by satellite mapping of smoke plumes and ground-level monitoring. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(21):8164. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph17218164>
- Teyssiere R, Manangama G, Baldi I, et al. Assessment of residential exposures to agricultural pesticides: A scoping review. *PLoS One*. 2020;15(4):e0232258. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232258>
- Pinichka C, Makka N, Sukkumnoed D, et al. Burden of disease attributed to ambient air pollution in Thailand: A GIS-based approach. *PLoS One*. 2017;12(12):e0189909. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189909>
- Sohrabi S, Zietsman J, Khreis H. Burden of disease assessment of ambient air pollution and premature mortality in urban areas: The role of socioeconomic status and transportation. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(4):1166. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph17041166>
- Kheirbek I, Haney J, Douglas S, et al. The contribution of motor vehicle emissions to ambient fine particulate matter public health impacts in New York City: A health burden assessment. *Environ Health*. 2016;15(1):89. doi: <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0172-6>
- Shaw N, McGuire S. Understanding the use of geographical information systems (GIS) in health informatics research: A review. *J Innov Health Inform*. 2017;24(2):940. doi: <https://doi.org/10.14236/jhi.v24i2.940>
- Colmer J, Hardman I, et al. Disparities in $PM_{2.5}$ air pollution in the United States. *Science*. 2020;369(6503):575-8. doi: <https://doi.org/10.1126/science.aaz9353>
- Colombia, Instituto Nacional de Salud, Observatorio Nacional de Salud. Carga de enfermedad ambiental en Colombia. Informe técnico especial 10. Bogotá (Colombia): Instituto Nacional de Salud [internet]; 2018 [citado 2020 jul. 16]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10%20Carga%20de%20enfermedad%20ambiental%20en%20Colombia.pdf>
- Piñeros-Jiménez JG, Grisales-Romero H, Nieto-López E, et al. Contaminación atmosférica y sus efectos sobre la salud de los habitantes del Valle de Aburrá, 2008-2015. Medellín (Colombia): Área Metropolitana del Valle de Aburrá [internet]; 2018 [citado 2019 dic. 1]. Disponible en: https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Re-analisis/ContaminacionAtmosferica_y_sus_Efectos_en_la_Salud-AMVA_2019.pdf
- Rodríguez-Camargo LA, Sierra-Parada RJ, Blanco-Becerra LC. Análisis espacial de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en Bogotá según los valores de las guías de la calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud para enfermedades cardiopulmonares, 2014-2015. *Biomédica*. 2020;40(1):137-52. doi: <https://doi.org/10.7705/biomedica.4719>
- Londoño-Ciro LA, Cañón-Barriga JE. Metodología para la caracterización espacio-temporal de $PM_{2.5}$ en el área urbana de la ciudad de Medellín-Colombia. *Revista EIA*. 2018;15(30):113-32. doi: <https://doi.org/10.24050/reia.v15i30.1217>
- Mura I, Rangel-Pardo D, Gutiérrez-Salamanca PM, et al. The impact of mobility on the exposure to $PM_{2.5}$ in Bogotá, Colombia. Bogotá (Colombia): Universidad de los Andes [internet]; 2019. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/flexpaper/handle/1992/45291/u827278.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=1>
- Rodríguez-Villamizar LA, Rojas Díaz MP, Acuña Merchán LA, et al. Space-time clustering of childhood leukemia in Colombia: A nationwide study. *BMC Cancer*. 2020;20(1):48. doi: <https://doi.org/10.1186/s12885-020-6531-2>
- Valbuena-García AM, Rodríguez-Villamizar LA, Uribe-Pérez CJ, et al. A spatial analysis of childhood cancer and industrial air pollution in a metropolitan area of Colombia. *Pediatr Blood*

- Cancer. 2020;67(9):e28353. doi: <https://doi.org/10.1002/pbc.28353>
18. Grisales-Romero H, Piñeros-Jiménez JG, Nieto E, Porras-Cataño S, et al. Local attributable burden disease to $PM_{2.5}$ ambient air pollution in Medellín, Colombia, 2010-2016. *F1000Res*. 2021;10:428. doi: <https://doi.org/10.12688/f1000research.52025.1>
 19. Jaramillo JP, Patiño JM, Spera G, et al. El Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín 2014: un modelo territorial para la intervención estratégica. VII Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo, Barcelona-Montevideo, junio 2015. Departament d'Urbanisme i Ordenació del Territori. Universitat Politècnica de Catalunya [internet]; 2015 [citado 2021 feb. 10]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/80323>
 20. Colombia, Congreso de la República. Ley Estatutaria 1581, por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales. Departamento Administrativo de la Función Pública [internet]. 2012, octubre 17. [citado 2022 ene. 23]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=49981>
 21. Organización de Naciones Unidas. Manual X. Técnicas indirectas de estimación demográfica. New York: Naciones Unidas [internet]; 1986 [citado 2020 nov. 1]. Disponible en: https://unstats.un.org/unsd/demographic/standmeth/handbooks/Manual_X-es.pdf
 22. Cohen AJ, Brauer M, Burnett R, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet*. 2017;389(10082): 1907-18. doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
 23. Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades y Problemas Relacionados con la Salud. Décima revisión [internet]. Washington, D.C.: OPS; 2008 [citado 2022 ene. 23] Disponible en: <https://ais.paho.org/classifications/chapters/pdf/volume1.pdf>
 24. Colombia, Ministerio de Salud. Resolución 8430, por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud [internet]. 1993, octubre 4. [citado 2022 ene. 22]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/RESOLUCION-8430-DE-1993.PDF>
 25. Organización Panamericana de la Salud y Consejo de Organizaciones Internacionales de las Ciencias Médicas. Pautas éticas internacionales para la investigación relacionada con la salud con seres humanos (4.ª ed.). Ginebra: Consejo de Organizaciones Internacionales de las Ciencias Médicas (CIOMS) [internet]. 2016 [citado 2022 ene. 22]. Disponible en: https://cioms.ch/wp-content/uploads/2017/12/CIOMS-EthicalGuideline_SP_INTERIOR-FINAL.pdf
 26. Wendling ZA, Emerson JW, et al. Environmental Performance Index 2020. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy [internet]; 2020 [citado 2021 ene. 20]. Disponible en: <https://epi.yale.edu/downloads/epi2020report20210112.pdf>
 27. Jarup L. Health and environment information systems for exposure and disease mapping, and risk assessment. *Environ Health Perspect*. 2004;112(9):995-7. doi: <https://doi.org/10.1289/ehp.6736>
 28. Casallas A, Celis N, Ferro C, López Barrera E, Peña C, Corredor J, et al. Validation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ early alert in Bogotá, Colombia, through the modeling software WRF-CHEM. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2020;27(29):35930-40. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06997-9>
 29. Mangones SC, Jaramillo P, et al. Air pollution emission effects of changes in transport supply: The case of Bogotá, Colombia. *Environ Sci Pollut Res*. 2020;27:35971-8. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08481-1>
 30. Rodríguez-Villamizar LA, Rojas-Roa NY, Blanco-Becerra LC, et al. Short-term effects of air pollution on respiratory and circulatory morbidity in Colombia 2011-2014: A multi-city, time-series analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(8):1610. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph15081610>
 31. India State-Level Disease Burden Initiative Air Pollution Collaborators. The impact of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across the states of India: The Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet Planet Health*. 2019;3(1):e26-e39. doi: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30261-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30261-4)
 32. Frazer L. Down with road dust. *Environ. Health Perspect*. 2003;111(16):A892-A895. <https://doi.org/10.1289/ehp.111-a892>
 33. Chang CT. Assessment of influential range and characteristics of fugitive dust in limestone extraction processes. *J Air Waste Manag Assoc*. 2004;54(2):141-8. doi: <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470889>
 34. Nemer M, Giacaman R, Hussein A. Lung function and respiratory health of populations living close to quarry sites in Palestine: A cross-sectional study. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(17):6068. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph17176068>
 35. Hajat A, Hsia C, O'Neill MS. Socioeconomic disparities and air pollution exposure: A global review. *Curr Environ Health Rep*. 2015;2(4):440-50. doi: <https://doi.org/10.1007/s40572-015-0069-5>
 36. Chakraborty J, Basu P. Air quality and environmental injustice in India: Connecting particulate pollution to social disadvantages. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(1):304. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph18010304>
 37. Colmer J, Hardman I, et al. Disparities in $PM_{2.5}$ air pollution in the United States. *Science*. 2020;369(6503):575-8. doi: <https://doi.org/10.1126/science.aaz9353>
 38. Zhao J, Gladson L, Cromar K. A novel environmental justice indicator for managing local air pollution. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(6):1260. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph15061260>
 39. Colombia, Instituto Nacional de Salud, Observatorio Nacional de Salud. Primer Informe ONS. Aspectos relacionados con la frecuencia de uso de los servicios de salud, mortalidad y discapacidad en Colombia, 2011. Bogotá (Colombia): Imprenta Nacional de Colombia [internet]; 2013 [citado 2021 nov. 15]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Resumenes%20Ejecutivos/Resumen%20ejecutivo%20informe%201%20Mortalidad%20y%20discapacidad.pdf>
 40. Cendales R, Pardo C. Quality of death certification in Colombia. *Colomb. Med*. [internet]. 2018 [citado 2021 may. 30]; 49(1):121-7. <https://doi.org/10.25100/cm.v49i1.3155>
 41. Hernández-Avila M, Garrido F, Salazar-Martínez E. Sesgos en estudios epidemiológicos. *Salud Pública Méx*. [internet]. 2000 [citado 2021 dic. 20]; 42(5):438-46. <https://scielosp.org/pdf/spm/v42n5/3995.pdf>
 42. Colombia, Ministerio de Salud y Protección Social. Plan Decenal de Salud Pública, PDSP, 2012-2021. Bogotá (Colombia): Minsalud [internet]; 2013 [citado 2020 sep. 20]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/PSP/PDSP.pdf>



Esta obra se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional
 Más información: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>