

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE PM_{2.5} Y SU RELACIÓN CON LA MORTALIDAD CARDIOPULMONAR EN BOGOTÁ, COLOMBIA

SPATIAL DISTRIBUTION OF THE CONCENTRATIONS OF PM_{2.5} AND ITS RELATIONSHIP TO CARDIOPULMONARY MORTALITY IN BOGOTÁ, COLOMBIA

Rodríguez Camargo Laura Andrea¹

¹ Estudiante de la Facultad de Ingeniería Ambiental. Semillero de investigación Salud Ambiental grupo INAM – USTA y Protección Social y Salud Pública. Universidad Santo Tomás de Bogotá D.C., Colombia.
e-mail: lauraandrea.rodriguez@gmail.com – laura.rodriguez@usantotomas.edu.co

RESUMEN

El presente trabajo busca establecer las zonas de riesgo por mortalidad cardiopulmonar derivada de la exposición a PM_{2.5} en Bogotá para el periodo 2014 – 2015. Para ello se utilizaron los datos horarios de PM₁₀ y PM_{2.5} de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RM CAB), para completar los datos faltantes se utilizó la relación PM_{2.5}/PM₁₀, posteriormente se generaron mapas de dispersión utilizando un software geoespacial, también se establecieron cuatro franjas horarias (12:00 a.m. - 6:00 a.m.; 6:00 a.m. - 12:00 p.m.; 12:00 p.m. - 6:00 p.m., 6:00 p.m. - 12:00 a.m.) para un mejor análisis del comportamiento de los contaminantes. Para obtener los mapas de riesgo por mortalidad cardiopulmonar por la exposición a PM_{2.5}, se utilizaron los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), cambiando los valores de concentración obtenidos, por los valores establecidos en los objetivos intermedios (OI) de la guía de calidad del aire (GCA) de la OMS para los promedios diarios y anuales de PM_{2.5}.

Los resultados que se obtuvieron mostraron que la localidad de Kennedy presentó un mayor riesgo por mortalidad cardiopulmonar; registrando un promedio de 25 µg/m³ en la franja de 6:00 a.m. a 12:00 p.m. que al ser comparada con los valores guía de la OMS en relación al promedio anual, se ubica en el OI-2, el cual establece que estos niveles aumentan el riesgo de mortalidad prematura aproximadamente en un 9% comparado con el nivel del OI-1. Al comparar dicho valor (25 µg/m³) con el promedio diario, se observó mayor riesgo, ya que este promedio se ubicó por encima del valor GCA que establece que este valor incrementa en 1,2% la mortalidad a corto plazo.

Palabras Clave: PM_{2.5}, Sistemas de Información Geográfica, mortalidad cardiopulmonar, riesgo, OMS.

ABSTRACT

The present study aims to establish the risk zones for cardiopulmonary mortality derived from exposure to PM_{2.5} in Bogotá for the period 2014-2015. For this purpose, the hourly data of PM₁₀ and PM_{2.5} of the Quality Monitoring Network Air of Bogotá (RM CAB), the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio was used to complete the missing data, dispersion maps were then generated using geospatial software, four slots were also established (12:00 am - 6:00 am; 6:00 a.m. - 12:00 p.m. 12:00 p.m. - 6:00 p.m., 6:00 p.m. - 12:00 p.m.) for a better analysis of the behavior of contaminants. To obtain risk maps for cardiopulmonary mortality from exposure to PM_{2.5}, guideline values recommended by the World Health Organization (WHO) were used, changing the concentration values

obtained by the values established in the intermediate objectives (OI) of the WHO air quality guide (GCA) for the daily and annual averages of PM_{2.5}.

The obtained results showed that the locality of Kennedy presented a greater risk by cardiopulmonary mortality; recording an average of 25 µg/m³ in the time band of 6:00 a.m. at 12:00 p.m. Compared with WHO guideline values relative to the annual average, it is located in the OI-2, the level of which these levels increase the risk of mortality by 9% compared to the OI-1 level. The highest risk was observed when comparing the value (25 µg/m³) with the main daily, since this average is above the GCA value, which establishes that the increase value in 1.2% of short-term mortality.

Keywords: PM2.5, Geographic Information Systems, cardiopulmonary mortality, risk, WHO.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica se ha convertido en una amenaza para la salud pública a nivel mundial, se ha encontrado que el crecimiento urbanístico y poblacional, y las diferentes actividades económicas e industriales generan mayores emisiones de contaminantes como ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado (PM), siendo este último uno de los de mayor interés mundial por los altos registros de promedios anuales en diferentes ciudades principalmente de Asia (1,2), a su vez es una problemática creciente que afecta tanto a países desarrollados como en vía de desarrollo, como es el caso de Colombia, el cual se presentara a continuación, así como una exploración de los efectos en la salud del PM a nivel mundial y nacional.

La contaminación del aire en Colombia es una de las problemáticas ambientales de gran preocupación e interés, ya que genera efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana, siendo el mayor problema ambiental en el país que genera grandes costos económicos y sociales estimados en aproximadamente 1.5 billones de pesos anuales (3).

Colombia dispone de 21 Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA), los cuales monitorean contaminantes criterio, donde los de mayor preocupación son el PM₁₀ y el PM_{2.5}, ya que sus concentraciones entre el 2011 y el 2015 excedieron los límites máximos permisibles tanto nacionales como internacionales. El Área Metropolitana del Valle de Aburra registró concentraciones de 70 µg/m³ de PM₁₀ y de más de 40 µg/m³ de PM_{2.5} en periodos de 24 horas. En la zona minera del Cesar y ciudades como Santa Marta, Medellín, Cali y en el suroccidente de Bogotá se presentaron excedencias que se clasificaron en la categoría “dañina para la salud para grupos sensibles” y “dañina para la salud” según los establecido en el Índice de Calidad del Aire (ICA) de Colombia adoptado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial (4–6).

Bogotá es una de las ciudades con mayor presencia de contaminantes atmosféricos, principalmente de material particulado generado en su mayoría por fuentes móviles y por el sector industrial (7). El *Plan decenal de descontaminación del aire para Bogotá 2010-2020*, presentó un diagnóstico del estado y las tendencias observadas en los últimos años respecto a la calidad del aire de la ciudad; el documento incluyó mapas de isoconcentraciones de PM₁₀ para el 2009, revelando que las localidades de Puente Aranda, Kennedy, Rafael Uribe Uribe, Engativá, Tunjuelito, Bosa, Fontibón y algunas áreas de la localidad de Suba y Ciudad Bolívar son zonas con altos niveles de PM₁₀ y PST (8). Para este mismo año, la Universidad de los Andes y el University College realizaron una caracterización de la contaminación atmosférica de la ciudad,

confirmando que las mayores concentraciones se dan en el occidente de la ciudad, mientras que las estaciones Ferias, Simón Bolívar, Kennedy y Tunal (que monitoreaban $PM_{2.5}$), presentaron un comportamiento similar al del PM_{10} (9).

Durante los años 2014 y 2015 la concentración anual de PM_{10} para Bogotá fue de $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, mientras que para $PM_{2.5}$ el nivel registrado en la capital fue de $21,5$ y $18,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el mismo periodo (36); el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en el año 2016 estableció que entre los años 2011 a 2015, el PM_{10} y $PM_{2.5}$ en las estaciones Kennedy y Carvajal registraron los promedios anuales más altos del país, donde aproximadamente un 20% reporta concentraciones mayores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y alrededor del 15% de los datos presentan concentraciones mayores a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$, obteniendo un ICA con una categoría de "Dañina a la salud"; otras estaciones de la RMCAB como Tunal, Suba, Centro de Alto Rendimiento y Ministerio de Ambiente también registraron concentraciones que exceden los límites anuales máximos permisibles (5) tanto de la normativa nacional (PM_{10} : $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $PM_{2.5}$: $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (10), como de los valores guía propuestos por la OMS (PM_{10} : $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $PM_{2.5}$: $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (11). La excedencia de las concentraciones afecta aproximadamente a ocho millones de habitantes, principalmente de las localidades de Bosa, Tunjuelito, Kennedy y Ciudad Bolívar debido a la dinámica de los vientos, la alta cantidad de industrias y de flujo vehicular (36).

De acuerdo a las cifras y datos tanto de PM_{10} como de $PM_{2.5}$ a nivel mundial y local mencionados anteriormente se busca destacar los efectos en la salud humana causados por el PM, ya que surgen principalmente por su diámetro, puesto que puede entrar al tracto respiratorio y producir daños en los tejidos y órganos del mismo, e incluso sirven como vehículo para transportar virus y bacterias (10). La exposición a $PM_{2.5}$ se ha relacionado con enfermedades respiratorias, cáncer pulmonar, silicosis, afectaciones al sistema cardiovascular, entre otras (12). Estas afectaciones se dan principalmente por que el $PM_{2.5}$ además de ser un tipo de partícula respirable, es una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos con una composición química muy variada, pudiendo estar constituidas por metales como calcio, zinc, silicio, plomo, hierro y cadmio y por compuestos como azufre, carbono y nitrógeno; considerando lo anterior, a continuación se mostrara el panorama de las afectaciones a la salud humana causadas por PM tanto a nivel internacional como nacional (13).

A nivel mundial se estima que las partículas finas causan alrededor del 8% de las muertes por cáncer de pulmón, 5% por causas cardiopulmonares y un 3% por infecciones respiratorias. En países como Egipto, Indonesia, India, China y Tailandia se excede más de 3 veces el valor propuesto para PM_{10} en las guías de la OMS (14). Estudios realizados en más de 30 ciudades del mundo reiteran la relación entre la mortalidad y morbilidad total, cerebrovascular y respiratoria con los niveles de PM tanto grueso (PM_{10}) como fino ($PM_{2.5}$), especialmente en ciudades de clima seco. De estos estudios han identificado mecanismos de daño inflamatorios, de estrés oxidativo y alteraciones del sistema nervioso (4).

Estudios realizados en México, Brasil y Cuba muestran un aumento en las consultas por enfermedades respiratorias agudas (ERA) (13). Chile ha reportado una fuerte asociación entre el riesgo de hospitalizaciones de pacientes con insuficiencia cardiaca y la exposición a material particulado, ya que aumentan los casos isquémicos agudos, así como el riesgo de arritmias e incluso altera la función autonómica (15); Ciudad de México, Santiago de Chile y Bogotá superan entre tres y cuatro veces los valores guía de la OMS para PM_{10} , incrementando el riesgo de morbilidad y mortalidad (un aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ incrementa el riesgo de mortalidad cardiovascular entre un 0.1% - 1.2% y respiratoria entre 0,5% - 1.4%) en temporadas invernales o frías (16).

En Colombia la contaminación del aire especialmente por PM causa 5.000 muertes prematuras, además cada año se registran cerca de 4.700 casos nuevos de bronquitis crónica atribuidos a la contaminación del aire urbano (14). Estudios epidemiológicos realizados por la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá han demostrado que un incremento en la concentración de contaminantes como ozono, dióxido de nitrógeno, PM_{10} y $PM_{2.5}$ produce un aumento en el número de casos por ERA, además de encontrar una relación directamente proporcional con el aumento entre 10 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentración de $PM_{2.5}$ y el incremento entre un 13 y 24% en las consultas por enfermedades respiratorias respectivamente; las consultas por enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) aumentan un 13% por incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $PM_{2.5}$ y de 28% por incremento de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $PM_{2.5}$ (3).

A pesar de los diferentes estudios realizados en Bogotá y de disponer de una red de monitoreo que recolecta información desde 1997, las series que se tienen no muestran tendencias sostenidas o un propósito fijo y realmente útil (7), por lo que es necesario generar estudios que utilicen de manera significativa esta información produciendo, validando y capturando nuevos conocimientos que puedan ser utilizados como herramienta para llevar a cabo y cumplir de manera efectiva y eficaz los lineamientos planteados en las diferentes normativas vigentes.

Teniendo en cuenta lo anterior el objetivo de la presente investigación fue establecer las zonas de riesgo por mortalidad cardiopulmonar derivada de la exposición a $PM_{2.5}$ en la ciudad de Bogotá, tomando como referencia los valores guía establecidos por la OMS, mediante el uso de un software geoespacial, utilizando la información de la RMCAB que disponía de registros de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para el periodo 2014 - 2015.

METODOLOGÍA

Tipo de estudio: Es un estudio ecológico en el cual se utilizó un software geoespacial (epidemiología espacial), el cual se realizó en la ciudad de Bogotá capital de Colombia durante los años 2014 a 2015; la ciudad cuenta con una división administrativa de 20 localidades, con una población de 7.878.783 habitantes (37), se ubica a una altura de 2640 m.s.n.m y se caracteriza por tener un clima moderadamente frío, cerca de los 14°C en periodos de lluvia caracterizados en los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre; sin embargo, en días soleados se pueden alcanzar los 23°C (38).

Información meteorológica y de contaminantes del aire: Se obtuvo información horaria de la RMCAB para los años 2014 a 2015, de las estaciones que median $PM_{2.5}$ (Carvajal, Centro de Alto Rendimiento, Kennedy, Ferias, Ministerio de Ambiente, Guaymaral, San Cristóbal, Usaquén, Tunal y Suba). El periodo de análisis y las estaciones se seleccionaron en cuanto a la disponibilidad de registros de los contaminantes y su continuidad en la medición a través de los años.

Análisis de los contaminantes: En primer lugar se realizó un análisis estadístico descriptivo de los datos horarios de PM_{10} y $PM_{2.5}$ utilizando un software de análisis estadístico; se calcularon la cantidad de datos válidos y datos perdidos, así como los máximos y mínimos, la media y la desviación estándar. Adicionalmente para ver los datos perdidos y la tendencia de los mismos se realizaron gráficos de secuencia y posteriormente se hicieron las correspondientes imputaciones para solucionar el problema de datos faltantes de PM_{10} , las imputación es una técnica que permite establecer supuestos, esto se hace sustituyendo los valores perdidos o faltantes por unos estimados a partir de los datos existentes (11).

Posteriormente mediante la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ se obtuvieron los datos faltantes de $PM_{2.5}$. Esta relación ha sido documentada como una herramienta que permite estimar

las concentraciones de $PM_{2.5}$ a partir de los datos existentes de PM_{10} (17) y ha sido abordada en Colombia por otros investigadores como Rojas (17), Echeverri (18), Blanco (19) y Larsen (20).

Al obtener las concentraciones horarias de $PM_{2.5}$ para el periodo de estudio, se generaron mapas de dispersión en el software geoespacial; para ello fue necesario reorganizar los datos obteniendo promedios mensuales y anuales por estación, separándolos en 4 franjas como se indica en la Tabla 1, esto con el fin de analizar las concentraciones y su comportamiento, los cuales cambian debido a las variables meteorológicas y las fuentes móviles y fijas responsables de las emisiones.

Tabla 1. Franjas horarias seleccionadas para el estudio

Franja	Hora
A	12:00 a.m. - 6:00 a.m.
B	6:00 a.m. - 12:00 p.m.
C	12:00 p.m. - 6:00 p.m.
D	6:00 p.m. - 12:00 a.m.

Fuente. El autor

Para comenzar a generar los mapas se creó un shape, es decir un formato en el cual se almacena la ubicación geométrica y la información de los atributos en este caso de la ubicación de las estaciones; que además fueron georreferenciadas, para ello se transformaron las coordenadas del sistema decimal al sexagesimal (21).

Luego se cargaron las concentraciones de $PM_{2.5}$ a la tabla de atributos del shape para posteriormente hacer la interpolación, en este caso se utilizaron dos métodos, el primero fue el Inverso de la distancia (*IDW*) caracterizado por su sencillez y consiste en estimar los datos ponderado los valores de las muestras según la distancia, es decir que se asignan mayores pesos a las muestras más cercanas y menos peso a las más lejanas (22).

El segundo método que se utilizó fue el de *Krigging*, conocido también como BLUE (Best Linear Unbiased Estimator), es un método que busca reducir el error medio cuadrático ya que para la predicción tiene en cuenta las características de la variabilidad y la correlación espacial, es decir que supone que la distancia y/o la dirección entre los puntos tienen una relación estadística (22,23).

Sin embargo, para determinar cuál de los dos métodos se debía utilizar fue necesario hacer un análisis exploratorio de los datos en el software geoespacial, para ello se utilizó la herramienta de análisis estadístico espacial llamada *Densidad de Kernel*, la cual busca representar la frecuencia de aparición de los datos o una variable de manera visual, al calcular la densidad en los mapas se aplica un área de búsqueda circular la cual determina la distancia para expandir los valores alrededor de cada ubicación (41).

Finalmente para obtener los mapas de riesgo a la salud en la población por la exposición a $PM_{2.5}$, se utilizaron los valores guía recomendados por la OMS; mediante la herramienta *Reclasificar* del software geoespacial, se cambiaron los valores de concentración provenientes de la base de datos de la RMCAB por los valores de los objetivos intermedios (OI) y guía calidad del aire (GCA) de la OMS (Tabla 9 y 10), para el promedio diario y anual de $PM_{2.5}$.

RESULTADOS

Comportamiento del PM₁₀

Las Tablas 2 y 3 muestran que el rango entre los datos anuales mínimos y máximos horarios de PM₁₀ es muy amplio sobre todo en la estación Carvajal que va de un mínimo de 10 hasta un máximo de 441 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 2014, mientras en 2015 el rango va desde 7 hasta 448 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de la estación Tunal que también presentó un rango alto que va de 1 a 444 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; estas altas concentraciones de PM₁₀ se consideran normales, ya que existen diferentes fuentes de emisión de PM₁₀ que generan registros con altos valores en ciertas localidades como la de Carvajal, que presenta la media horaria anual más alta en el 2014, seguido de la estación Kennedy, mientras que las medias horarias anuales más bajas se registraron en las estaciones Guaymaral y Ferias.

El porcentaje de datos horarios disponibles muestra que tanto en el 2014 como en el 2015, todas las estaciones de la RMCAB menos Guaymaral presentaron porcentajes por encima del 75%, cumpliendo así con el criterio de suficiencia del 75% planteado dentro del estudio, como condición para llevar a cabo el proceso de imputación de los registros horarios del contaminante.

Tabla 2. Distribución horaria de PM₁₀ en las localidades de estudio año 2014

Estación	Localidad	Media $\mu\text{g}/\text{m}^3$	D.E	Máx. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mín. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	% Datos disponibles
Carvajal	Kennedy	91,1	43,445	441	10	86,8
Centro de alto rendimiento	Barrios Unidos	39,53	27,386	271	2	77,3
Guaymaral	Suba	30,11	23,612	245	2	66,4
Kennedy	Kennedy	71,23	37,240	285	11	92
Ferias	Engativá	32,06	23,375	212	2	87,8
Ministerio del Medio Ambiente	Santa Fe	43,02	27,765	259	7	97,6
San Cristóbal	San Cristóbal	41,1	29,021	346	2	83,4
Suba	Suba	50,64	26,527	350	8	93,7
Tunal	Tunjuelito	52,45	35,737	322	5	74,8
Usaquén	Usaquén	37,15	22,241	194	3	87,2

D.E: Desviación Estándar; Máx: Máximo. Mín: Mínimo.

Fuente: El autor

Para el 2015 las estaciones con mayor promedio horario anual al igual que en el 2014 fueron Carvajal y Kennedy, mientras que las de menor concentración horaria en el año fueron San Cristóbal, Centro de Alto Rendimiento y Usaquén. Este año se presentó un alto porcentaje de datos horarios disponibles en todas las estaciones (por encima del 90%) garantizando calidad en los resultados de interpolación.

Tabla 3. Distribución horaria de PM₁₀ en las localidades de estudio año 2015

Estación	Localidad	Media µg/m ³	D.E	Máx. µg/m ³	Mín. µg/m ³	% Datos disponibles
Carvajal	Kennedy	86,41	41,545	448	7	97,1
Centro de alto rendimiento	Barrios Unidos	28,22	22,961	177	1	96,3
Guaymaral	Suba	30,84	19,248	382	2	97,5
Kennedy	Kennedy	66,26	32,948	335	12	99,4
Ferías	Engativá	34,78	22,847	171	1	91,6
Ministerio del Medio ambiente	Santa Fe	33,67	22,974	333	4	99,5
San Cristóbal	San Cristóbal	25,55	23,791	405	1	96,9
Suba	Suba	47,46	25,291	380	2	89,8
Tunal	Tunjuelito	42,71	27,486	444	1	98,8
Usaquén	Usaquén	29,74	17,498	204	2	96,5

D.E: Desviación Estándar; Máx: Máximo. Mín: Mínimo.

Fuente: El autor

Comportamiento PM_{2,5}

En las Tablas 4 y 5 se muestra el comportamiento horario anual de PM_{2,5} en cada estación para el periodo de estudio. Para 2014 la estación Carvajal registró el mayor promedio horario anual, seguida de Kennedy, mientras que los menores promedios horarios anuales se presentaron en las estaciones San Cristóbal, Usaquén, Ministerio del Medio Ambiente, Guaymaral y Ferías, donde Tunal reportó un promedio horario anual relativamente bajo, a pesar de que geográficamente la estación está muy cerca a las estaciones Carvajal y Kennedy. Los valores máximos horarios se ubicaron en el rango de 64 µg/m³ (San Cristóbal) a 170 µg/m³ (Tunal).

La mayoría de estaciones contaban con más del 60% de datos horarios de PM_{2,5} disponibles, donde las estaciones Carvajal, Kennedy y Tunal son las que tienen una mayor cantidad de datos, sin embargo todas se tuvieron en cuenta para el análisis tanto estadístico como gráfico del comportamiento del contaminante, incluyendo Guaymaral que tiene menos datos (21,98%), sin embargo se tuvo en cuenta, ya que es una zona de interés y en el momento de hacer una representación gráfica del contaminante se tendrá una mejor aproximación de la distribución y comportamiento del mismo.

Tabla 4. Distribución horaria de PM_{2.5} en las localidades de estudio año 2014

Estación	Localidad	Media µg/m³	D.E	Máx. µg/m³	Mín. µg/m³	% Datos disponibles
Carvajal	Kennedy	33,62	88,604	152	1,20	87,6 %
Centro de alto rendimiento	Barrios Unidos	22,51	83,255	118	1,00	77,2 %
Guaymaral	Suba	19,19	44,201	90	0,20	21,98%
Kennedy	Kennedy	32,55	89,832	159	2,00	89,6%
Ferías	Engativá	20,55	78,166	143	1,00	68,0%
Ministerio del Medio Ambiente	Santa Fe	17,33	81,146	166	0,20	73,3%
San Cristóbal	San Cristóbal	10,16	73,986	64	0,20	59,2%
Suba	Suba	22,46	83,132	124	0,20	77,2%
Tunal	Tunjuelito	24,73	90,208	170	1,10	90,1%
Usaquén	Usaquén	15,02	82,464	77	0,10	76,6%

D.E: Desviación Estándar; Máx: Máximo. Mín: Mínimo.
Fuente: El autor

Para el año 2015 la estación de Carvajal siguió reportando el mayor promedio horario y San Cristóbal el menor, sin embargo los promedios horarios de las concentraciones fueron menores con respecto al 2014, pero en la estación Ministerio del Medio Ambiente se reportó un máximo horario de 311 µg/m³ siendo el valor más alto en ambos años. El porcentaje de datos validos en las estaciones superó el 80%, excepto en Ferías que tiene un 74% de datos disponibles.

Tabla 5. Distribución horaria anual de PM_{2.5} en las localidades de estudio año 2015

Estación	Localidad	Media µg/m³	D.E	Máx. µg/m³	Mín. µg/m³	% Datos disponibles
Carvajal	Kennedy	30,72	13,797	149	0,20	94,5%
Centro de alto rendimiento	Barrios Unidos	15,93	11,398	132	0,30	92,3%
Guaymaral	Suba	16,08	10,861	118	0,20	94,4%
Kennedy	Kennedy	27,00	15,064	135	0,30	98,3%
Ferías	Engativá	17,04	12,371	96	0,10	74,3%
Ministerio del Medio Ambiente	Santa Fe	14,65	12,838	311	0,20	97,6%
San Cristóbal	San Cristóbal	8,8990	6,990	72	0,10	89,3%
Suba	Suba	21,57	12,726	105	0,70	92,1%
Tunal	Tunjuelito	21,30	14,412	114	1,00	95,0%
Usaquén	Usaquén	12,87	9,675	96	0,20	86,0%

D.E: Desviación Estándar; Máx: Máximo. Mín: Mínimo.
Fuente: El autor

Comportamiento del PM_{2.5} por franjas

De acuerdo al cálculo de los promedios (seis horas) por franjas para los años de estudio (Tabla 6), se evidenció que los mayores promedios de concentración se dieron en la franja b (6 a.m. a 12 p.m.) para ambos años, seguida de la franja d (6 p.m. a 12 a.m.); estas franjas abarcan las horas pico de la ciudad lo que muestra que en estas horas se generan las mayores emisiones de contaminantes por las diferentes actividades industriales y comerciales que comienzan y finalizan en estos periodos de tiempo, así como el masivo desplazamiento de ciudadanos por toda la ciudad.

Si se comparan los valores de los promedios seis horas por franja, contra los valores diarios y anuales establecidos en la normativa nacional (Resolución 610 del 2010), como la internacional (Guías de la OMS), asumiendo que estas concentraciones se pueden presentar en un día y además se podrían registrar durante los 365 días del año, se establece que en relación al promedio 24 horas no existe una excedencia de la normativa nacional (50 µg/m³).

En cuanto al valor anual de 25 µg/m³ establecido por la normativa nacional, los promedios por franja no exceden el valor norma, pero se ubican dentro de los objetivos intermedios 2 y 3, excediendo el valor guía sugerido por la OMS (10 µg/m³).

Tabla 6. Distribución promedio (seis horas) de PM_{2.5} para cada franja año 2014 y 2015

Año	Franjas	Promedio µg/m ³	Máximo µg/m ³	Mínimo µg/m ³
2014	a	18,92	159,00	0,10
	b	25,65	170,20	0,10
	c	19,84	124,60	0,20
	d	22,41	129,80	0,20
2015	a	16,86	311,00	0,10
	b	21,52	149,90	0,20
	c	16,92	124,50	0,10
	d	19,47	238,00	0,10

Fuente: El autor

Como se mencionó anteriormente en la *franja b* es donde se presentan los mayores promedios en las concentraciones de PM_{2.5}, principalmente en las estaciones Kennedy y Carvajal, mientras que en la estación San Cristóbal se reportó la menor concentración promedio (Tabla 7).

Tabla 7. Distribución horaria en la franja b de PM_{2.5} en las localidades de estudio año 2014

Estación	Localidad	Media (6 horas) µg/m ³	D.E	Máx. µg/m ³	Mín. µg/m ³
Carvajal	Kennedy	38,34	18,86	152,30	1,2
Centro de alto rendimiento	Barrios Unidos	24,20	16,19	118,40	1,00
Guaymaral	Suba	18,88	14,20	87,50	0,20
Kennedy	Kennedy	39,37	20,98	125,80	4,70
Ferías	Engativá	22,19	14,39	96,10	1,40

Estación	Localidad	Media (6 horas) µg/m³	D.E	Máx. µg/m³	Mín. µg/m³
San Cristóbal	San Cristóbal	11,87	9,31	64,20	0,20
Suba	Suba	21,81	14,67	86,00	0,20
Tunal	Tunjuelito	28,18	21,43	170,20	2,60
Usaquén	Usaquén	16,35	12,48	77,80	0,10

D.E: Desviación Estándar; Máx: Máximo. Mín: Mínimo.

Fuente: El autor

En la franja b para el 2015 las estaciones Kennedy y Carvajal vuelven a reportar los valores promedio más altos y San Cristóbal vuelve a registrar el promedio de concentración más baja (Tabla 8).

Tabla 8. Distribución horaria en la franja b de PM_{2,5} en las localidades de estudio año 2015

Estación	Localidad	Media (6 horas) µg/m³	D.E	Máx. µg/m³	Mín. µg/m³
Carvajal	Kennedy	32,54	15,31	149,90	0,20
Centro de alto rendimiento	Barrios Unidos	19,83	15,30	103,80	0,30
Guaymaral	Suba	15,76	12,40	82,30	0,20
Kennedy	Kennedy	32,83	19,12	120,50	1,00
Ferías	Engativá	19,85	13,68	96,50	0,40
Ministerio del Medio Ambiente	Santa Fe	20,10	15,01	95,00	0,50
San Cristóbal	San Cristóbal	10,81	7,83	61,40	0,20
Suba	Suba	21,83	14,44	104,00	0,70
Tunal	Tunjuelito	24,62	17,77	114,00	1,00
Usaquén	Usaquén	15,22	11,15	84,00	0,20

D.E: Desviación Estándar; Máx: Máximo. Mín: Mínimo.

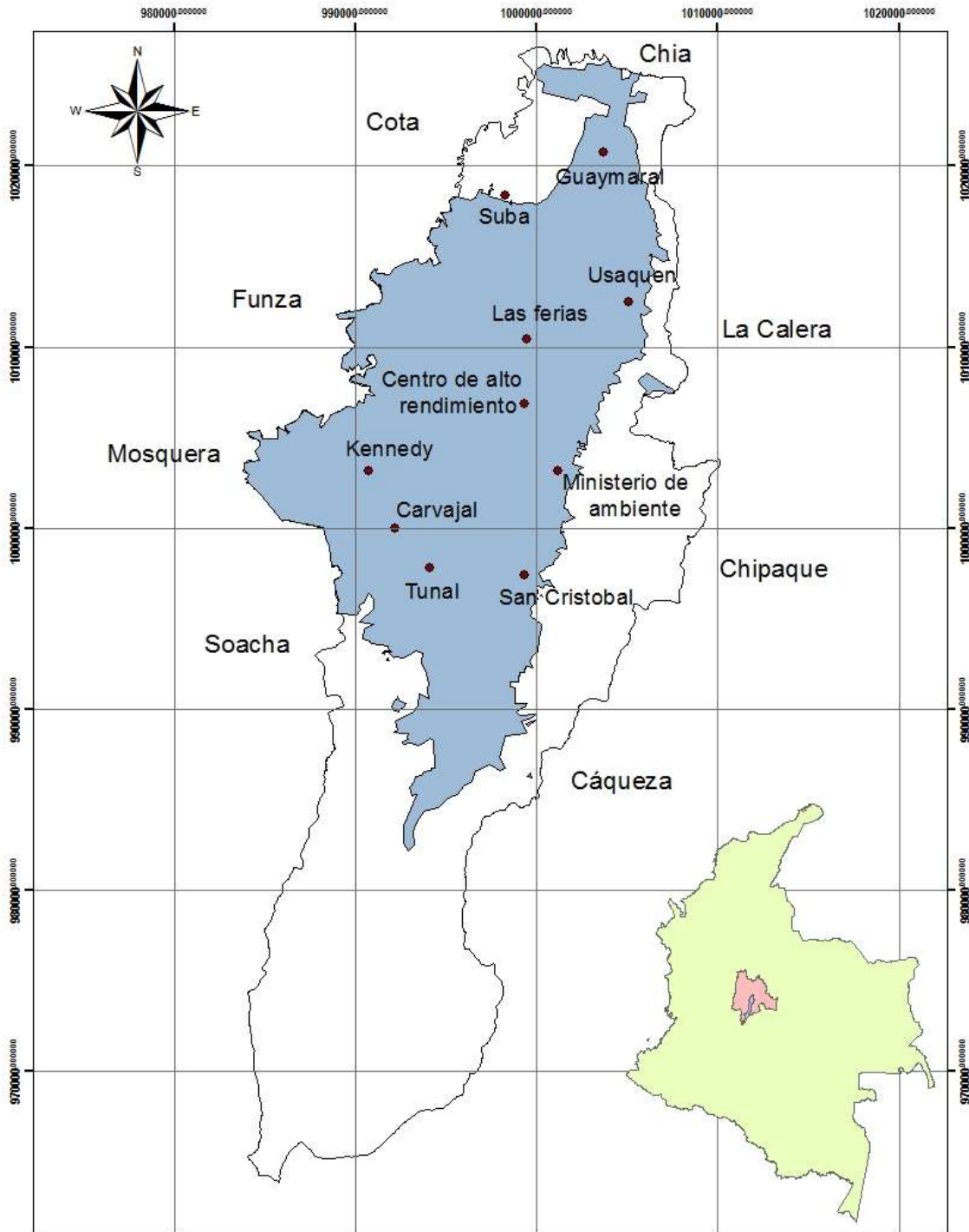
Fuente: El autor

En todos los casos los valores mínimos están alrededor de 0 lo que se puede atribuir a un error en la medición o alguna falla técnica del equipo, ya que siempre existe una emisión de PM_{2,5}, cuyo origen pueden ser concentración de las zonas de mayores emisiones que han sido dispersadas por el viento, el efecto acumulativo (remanentes de horas anteriores) y la presencia de actividades industriales y comerciales generadoras de emisiones ya sean altas o bajas, por lo tanto una emisión de PM_{2,5} de 0 se considera como una valor que no es viable.

Mapas de dispersión

En el Mapa 1 se observa la distribución y ubicación de las estaciones de la RMCAB que se utilizaron para elaborar los mapas de dispersión de $PM_{2.5}$ para los años de estudio. Se evidencia que las estaciones se encuentran ubicadas en la zona urbana de la ciudad (zona azul) y están distribuidas principalmente en la parte occidental, central y norte, por lo tanto es donde se tienen mejores predicciones, al contrario de la zona sur donde no se dispone de ningún tipo de información.

Mapa 1. Ubicación de las estaciones de la RMCAB 2014-2015



Fuente: El autor

Los métodos de interpolación se utilizan para generar una superficie de predicción en lugares donde no se tiene información, para tomar mejores decisiones al crear una superficie, primero se deben explorar los datos para obtener una mejor comprensión, para ello se utilizó la herramienta *densidad de Kernel*, esta represento el comportamiento de las variables utilizadas, las cuales fueron los promedios anuales de las concentraciones de PM_{2.5} de cada estación mencionada anteriormente, dando como resultados altas emisiones en el suroccidente de la ciudad (22).

De acuerdo a los resultados de los dos métodos de interpolación empleados (IDW y Kriging), el que mejor represento los datos y se ajustó al comportamiento de las concentraciones mostradas por la *densidad de Kernel* fue el método de *Kriggin*, por lo tanto fue el que se utilizó en la elaboración de todos los mapas, además de ser conocido por proporcionar resultados satisfactorios, ya que tiene errores de predicción reducidos (22).

Los promedios por franja obtenidos de la RMCAB fueron comparados con el promedio diario y anual sugeridos en la GCA de la OMS, con la finalidad de establecer el riesgo de mortalidad por enfermedades cardiopulmonares derivado de la exposición a PM_{2.5}. Lo anterior se realizó teniendo en cuenta que el promedio estimado por franja equivale al promedio de 24 horas al que se expone la población y además al ser este un promedio diario que se repite los 365 días, permite ser comparado con el valor del promedio anual al que está expuesta la población.

En los mapas se definieron entre 2 y 4 categorías, donde el número 1 representa los valores de concentración más bajos y el 4 los más altos, según los OI y GCA establecidos para el promedio diario y anual sugerido por la OMS (Tabla 9 y 10).

Tabla 9. Objetivos intermedios y guía de calidad del aire sugeridos por la OMS para PM_{2.5}. Concentración media diaria

Objetivos OMS	Concentración media 24 horas (µg/m³)	Fundamento del nivel
OI-1	75	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y meta-análisis (incremento de alrededor del 5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
OI-2	50	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y meta-análisis (incremento de alrededor del 2,5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
OI-3	37.5	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y meta-análisis (incremento de alrededor del 1,2% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
GCA	25	Basado en la relación entre los niveles de PM de 24 horas y anuales.

Fuente: (11)

Tabla 10. Objetivos intermedios y guía de calidad del aire sugeridos por la OMS para PM_{2.5}. Concentración media anual

Objetivos OMS	Concentración media anual (µg/m ³)	Fundamento del nivel
OI-1	35	Estos niveles están asociados con un riesgo de mortalidad a largo plazo alrededor de un 15% mayor que con el nivel de las GCA.
OI-2	25	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente [2-11%] en comparación con el nivel del OI-1.
OI-3	15	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad en un 6% [2-11%] aproximadamente en comparación con el nivel del OI-2.
GCA	10	Estos son los niveles más bajos con los cuales se ha demostrado, con más del 95% de confianza, que la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón, aumenta en respuesta a la exposición prolongada al PM _{2.5} .

Fuente: (11)

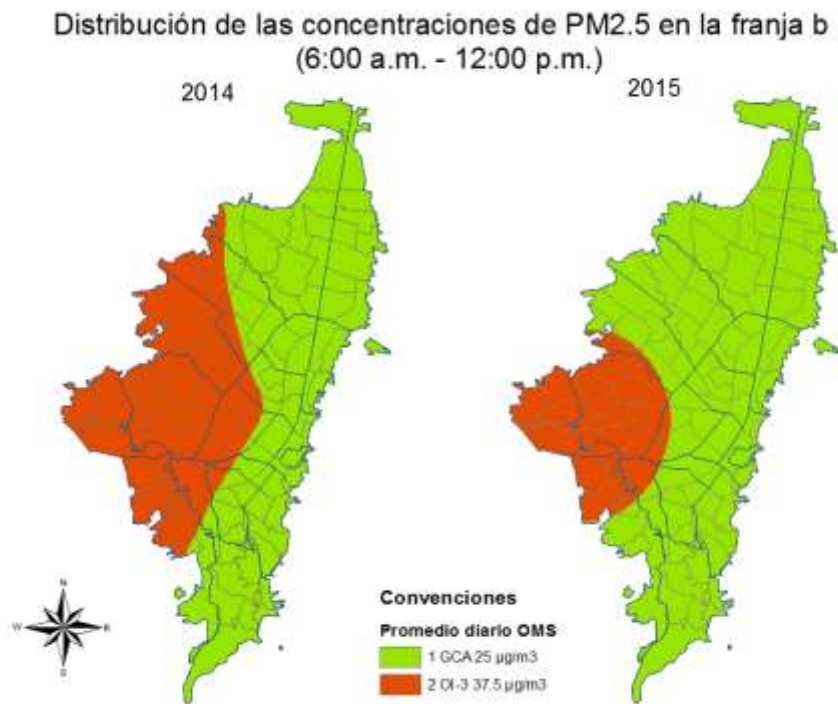
Clasificación del riesgo por mortalidad cardiopulmonar por exposición a PM_{2.5} en función del promedio 24 horas establecido en la Guía de Calidad del Aire de la OMS

Las concentraciones del promedio seis horas presentaron un comportamiento similar tanto en el 2014 como en el 2015, y en ninguna franja se superaron los 38 µg/m³, lo que significa que se ubicaron entre los valores GCA y el OI-3, es decir entre los valores más bajos con los cuales se ha demostrado que la mortalidad cardiopulmonar aumenta por exposiciones crónicas al contaminante y a los cuales se incrementan en un 1.2% la mortalidad en un periodo de exposición a corto plazo (11).

Para el año 2014, la *franja a* tuvo su mayor concentración ubicada en el OI-3 en la localidad de Kennedy, el resto de la ciudad tuvo valores bajos que cumplieron con los valores GCA.

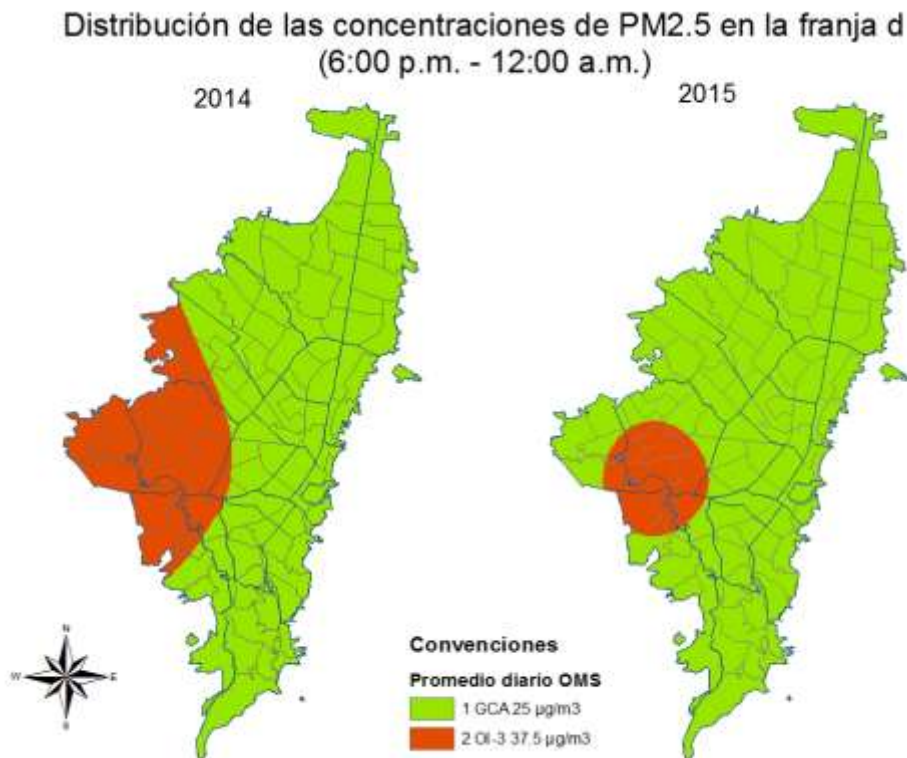
La *franja b* y *d* para este año (Mapa 2 y 3) registraron la mayor dispersión en el occidente, afectando casi la mitad de la ciudad específicamente las localidades de Bosa, Kennedy, Fontibón, Tunjuelito, Puente Aranda, Suba (UPZ Tibabuyes), Engativá (UPZ Garcés Navas, Bolivia, Boyacá Real, Santa Cecilia, Álamos y Jardín Botánico), Teusaquillo (UPZ Parque Simón Bolívar, Ciudad Salitre Oriental y Quinta Paredes), Ciudad Bolívar (UPZ Ismael Perdomo, Arborizadora, Jerusalén, San Francisco, Lucero y El Tesoro), Rafael Uribe Uribe (UPZ Quiroga) y Antonio Nariño (UPZ Restrepo).

Mapa 2. Distribución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la franja b. Promedio 24 horas. Zona urbana de Bogotá.



Fuente. El autor

Mapa 3. Distribución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la franja d. Promedio 24 horas. Zona urbana de Bogotá.



Fuente. El autor

En la *franja c* la dispersión disminuye notablemente, sin embargo siguen presentándose las mayores emisiones en la zona occidental de la ciudad afectando parcialmente a las localidades de Bosa, Kennedy, Tunjuelito y Ciudad Bolívar.

En el año 2015 la *franja a* tuvo tan solo un punto que se ubicó en el OI-3 en las UPZ Corabastos y Kennedy Central, el resto de la ciudad cumplió con los valores de la GCA, mientras que una gran dispersión se presentó en el occidente en mayor medida en la *franja b* afectando nuevamente toda la localidad de Kennedy y Bosa, parte de Ciudad Bolívar, Tunjuelito, Puente Aranda y Fontibón.

La *franja c* tan solo tuvo un punto con concentraciones ubicadas en el OI-3 en la UPZ Carvajal, el resto de la ciudad cumplió con los valores GCA y finalmente en la *franja d* vuelve a aumentar la dispersión al occidente pero en menor medida que en la *franja b* afectando aproximadamente 15 UPZ de esta zona de la ciudad, el resto de la ciudad cumple con los valores GCA.

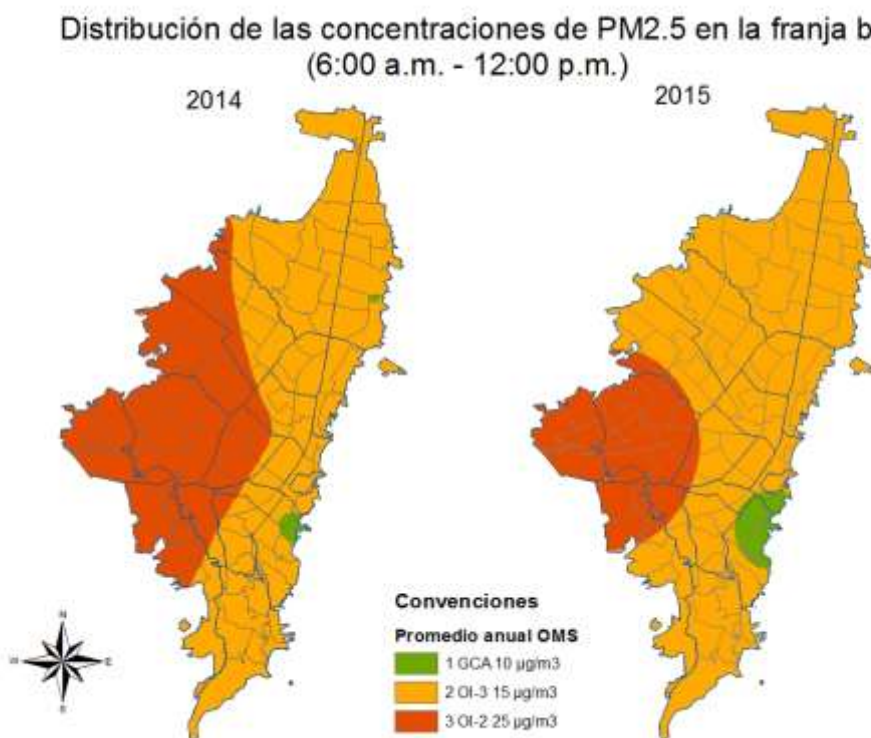
Clasificación del riesgo por mortalidad cardiopulmonar por exposición a PM_{2.5} en función del promedio anual establecido en la Guía de Calidad del Aire de la OMS

Para el año 2014 en la *franja a* la mayor parte de la ciudad (norte, sur, centro y una parte occidental) se ubicó en el OI-2 con concentraciones alrededor de 25 µg/m³, lo que reduce la mortalidad prematura en un 6% comparado con el OI-1 (el riesgo de mortalidad aumenta en un 15% en este objetivo) (11).

La zona oriental de la ciudad se localizó en los OI-3 y GCA; esto quiere decir que a niveles de exposición de 15 µg/m³ (valor del OI-3) el riesgo de mortalidad se reduce en un 6%, con respecto al OI-2 (el riesgo de mortalidad aumenta en un 9% en este objetivo) (11).

En la *franja b* no se alcanzó el valor del OI-1 (Mapa 4), sin embargo se observó una gran dispersión de las concentraciones alrededor de los 25 µg/m³ en la zona occidental de la ciudad abarcando por completo las localidades de Bosa, Fontibón, Kennedy y Puente Aranda, y de manera parcial Engativá, Antonio Nariño, Rafael Uribe Uribe, Tunjuelito y Ciudad Bolívar. El resto de la ciudad se ubicó en el OI-3 y tan solo la parte norte de la UPZ Usaquén y la parte sur de la UPZ Los Cedros ubicadas en la localidad de Usaquén, la UPZ Lourdes (localidad de Santa Fe) y parte de las UPZ de Sosiego, 20 de Julio y San Blas ubicadas en las localidades de San Cristóbal cumplen con la GCA, lo que indica que las concentraciones aumentaron en la parte oriental de la ciudad comparado con la *franja a* donde en esta zona se cumplen los valores GCA.

Mapa 4. Distribución de las concentraciones de PM_{2.5} en la franja b. Promedio anual. Zona urbana de Bogotá

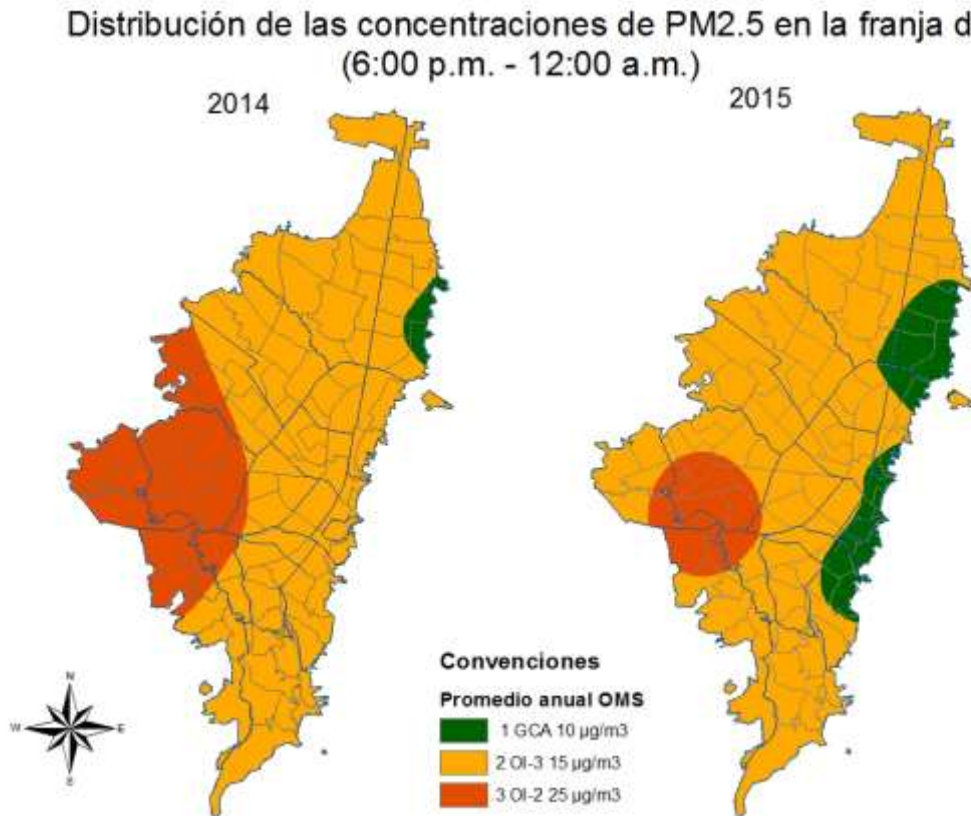


Fuente. El autor

En la *franja c* decrecen las concentraciones en el norte de la ciudad, cumpliendo con los valores GCA específicamente en las UPZ Guaymaral, Paseo de los Libertadores, La Academia y Verbenal ubicadas en la localidad de Guaymaral, mientras que otras UPZ como San José de Bavaria, Britalia, El Prado, Casa Blanca de Suba localizadas en la localidad de Suba y las UPZ La Uribe, Toberin, San Cristóbal Norte, Los Cedros, Country Club, Usaquén, Santa Bárbara, San Isidro localizadas en la localidad de Usaquén y en el suroriente de la ciudad en las localidades de San Cristóbal y en la UPZ de Lourdes ubicada en la localidad de Santa Fe, se ubican en el OI-3, es decir que no se superan los 15 µg/m³. Sin embargo en la parte occidental de la ciudad las concentraciones aumentan llegando al OI-1 (35 µg/m³) afectando de manera parcial las localidades de Kennedy, Bosa, Tunjuelito y San Cristóbal. El resto de la ciudad se ubicó en el OI-2.

Finalmente en la *franja d* (Mapa 5) las concentraciones vuelven a disminuir pero su dispersión aumenta en el occidente de la ciudad, así en el resto de la ciudad se tienen concentraciones alrededor de los 15 µg/m³ y tan solo una mínima parte de la localidad de Usaquén (UPZ San Cristóbal Norte, Los Cedros, Country Club, Usaquén y Santa Bárbara) cumplen con la GCA (10 µg/m³); estos son los niveles más bajos con los cuales se ha demostrado, que la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón, aumenta en respuesta a la exposición prolongada al PM_{2.5} (11).

Mapa 5. Distribución de las concentraciones de PM_{2.5} en la franja d. Promedio anual. Zona urbana de Bogotá



Fuente. El autor

En el 2015 para la *franja a* la mayor parte de la ciudad se encuentra en el OI-2 (25 µg/m³); en la zona oriental se registraron bajas concentraciones ubicándose en el OI-2 y en la zona norte de la localidad de San Cristóbal (UPZ La Candelaria, Lourdes, Las Cruces, Ciudad Jardín, Sosiego, San Blas y 20 de Julio) se cumple con los valores de GCA.

En la *franja b* las concentraciones disminuyen en la mayor parte de la ciudad ubicándose en el OI-3 (15 µg/m³); en la localidad de San Cristóbal se mantuvo el cumplimiento de la GCA, mientras que el occidente de la ciudad muestra una gran dispersión y concentraciones aproximadas de 25 µg/m³ (OI-2).

Por otro lado en la *franja c*, comparado con el año 2014, las concentraciones siguen disminuyendo encontrando solo registros entre 10 y 15 µg/m³ en toda la ciudad; en esta franja el oriente de la ciudad cumple con los valores de la CGA, mientras que el resto de la ciudad se ubica en el OI-3.

Finalmente en la *franja d*, las concentraciones vuelven a aumentar principalmente en el occidente de la ciudad volviendo a ubicarse en el OI-2, afectando parte de las localidades de Kennedy, Bosa, Ciudad Bolívar, Tunjuelito y Puente Aranda.

Teniendo en cuenta que gran parte de la ciudad presenta concentraciones de PM_{2.5} cercanas a los 37 µg/m³, se puede establecer que una proporción relevante de ciudadanos está expuesto a estos niveles de concentración en franjas horarias que van de las 6 a.m a 12 p.m y las 6 p.m a 12 a.m, precisando que no solo los habitantes de estas zonas se están viendo afectadas si no también la población flotante que

trabaja, estudia o se movilizan con frecuencia en estas zonas y franjas horarias, además de aquellos que están más expuestos como lo son conductores, policías de tránsito, vendedores ambulantes, ciclistas, entre otros; sin dejar de lado la población vulnerable como los niños y los mayores de 65 años, ya que en estas etapas la exposición a ciertos factores, como el $PM_{2.5}$, se vuelven más nocivas para la salud.

DISCUSIÓN

Esta investigación identificó que las zonas con mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron las del sur occidente de la ciudad, principalmente la localidad de Kennedy, así como lo estableció Ávila (24) en un estudio donde obtuvo como resultado que la estación de Kennedy presenta los mayores valores de $PM_{2.5}$ con promedios anuales y mensuales en un rango de 30 y 45 $\mu g/m^3$; no obstante los promedios por franja registrados en la presente investigación en esta estación obtuvieron valores entre 33 $\mu g/m^3$ (año 2014) y 30 $\mu g/m^3$ (año 2015), lo que muestra una disminución en las emisiones. Este estudio también encontró que las mayores concentraciones se dan de 6:00 a.m a 12:00 p.m y entre las 6:00 p.m y las 12:00 a.m, horas que corresponden a las *franjas b* y *d* del presente trabajo, coincidiendo con las horas de tráfico pico vehicular de la ciudad y el comienzo y final de algunos procesos industriales.

Otros autores como Gaitán, Cancino y Behrentz, utilizaron datos desde 1997 hasta 2007 establecen que la zona con mayores concentraciones de PM_{10} era la localidad de Puente Aranda (25); no obstante, los presentes resultados muestran que la zona si presenta una alta influencia por las concentraciones registradas, ya que se ve afectada principalmente en las horas pico de la mañana por la dispersión del contaminante, pero no es la que tiene las mayores emisiones, esto puede indicar que ciertas políticas y controles a las industrias de esta zona han funcionado, así como los controles al tráfico vehicular de todo tipo y el mantenimiento de los mismos.

Se sabe que una de las mayores fuentes de $PM_{2.5}$ es la combustión que proviene de los vehículos, por lo tanto el hecho de que estaciones como Kennedy y Carvajal estén ubicadas entre 2 vías principales y de gran afluencia vehicular como lo son la Autopista Sur y la Avenida Boyacá, contribuye considerablemente en las emisiones de $PM_{2.5}$; la estación Puente Aranda se encuentra entre la Calle 13, Avenida 68 y la Avenida de Las Américas lo que genera un punto de emisión relevante en esta zona.

Sin embargo estaciones como Ferias que se encuentra muy cerca a la Calle 80 y Centro de Alto Rendimiento que esta entre la Avenida 68 y Avenida Carrera 30, son estaciones que no presentan promedios tan altos de $PM_{2.5}$, pese a que no son zonas industriales, por el contrario tienen algunas zonas verdes como el Humedal Niza que se encuentra cerca de la estación de Ferias y el Parque Salitre Mágico, Simón Bolívar y el Distrital del Salitre cerca de la estación de Alto Rendimiento, lo que demuestra que la vegetación gracias a los procesos de fotosíntesis y evapotranspiración tiene la capacidad de regular la temperatura, purificar el aire, embellecer el paisaje, retener partículas contaminantes, entre otros (26).

Los beneficios de la vegetación en la calidad del aire particularmente, también se observan en la zona nororiental y oriental de la ciudad que limita con los Cerros Orientales; a pesar de que estaciones como Minambiente, Guaymaral, Usaquén e incluso San Cristóbal tienen proximidad a ejes viales importantes como la Autopista Norte, la Carrera 7 y 10, mostraron valores de $PM_{2.5}$ bajos e incluso en algunas horas del día cumplen con la GCA de la OMS, ya que gracias a la ubicación cercana de los cerros se benefician de los servicios brindados por la cobertura vegetal de los mismos, puesto que cumplen un papel muy importante en la regulación del clima, del suelo, las

diferentes fuentes hídricas y la depuración del aire, además de hacer parte de la Estructura Ecológica Principal Distrital lo que hace que los cerros presenten un gran significado ambiental y cultural (27).

Se evidenció que siempre los mayores niveles de $PM_{2.5}$ se concentran y dispersan en la zona sur-occidental de la ciudad, donde se ubica una alta actividad industrial sumada a un aporte importante de fuentes móviles en vías principales que por procesos de combustión aumentan las emisiones de $PM_{2.5}$. Esta zona de la ciudad limita con municipios como Soacha, Mosquera, Funza y Cota en los cuales también se tienen parques industriales que generan emisiones de PM, los cuales son puntos de llegada de vehículos de carga pesada que generan altas emisiones.

Adicionalmente la dinámica de los vientos es un factor importante, según los informes anuales de 2014 y 2015 se observó una fuerte tendencia de vientos con bajas velocidades en el sur de la ciudad y el nororiente, lo que puede influir en las bajas concentraciones de $PM_{2.5}$ en ciertas franjas, sin embargo los vientos con dirección de oriente a occidente predominan, lo que es una variable de gran influencia en la dispersión de $PM_{2.5}$ en esta zona de la ciudad (28,29).

La Secretaria Distrital de Planeación de Bogotá (SDP) en la caracterización socioeconómica del 2016 muestra que las localidades con mayor población son Suba y Kennedy (30), así como la Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital (IDECA) en sus mapas de densidad poblacional rectifica que la zona occidental de la ciudad es una de las más pobladas, específicamente las localidades de Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá y Suba, es decir que un alto número de personas se ven afectadas por los niveles de contaminación por $PM_{2.5}$, principalmente habitantes que hacen parte de los grupos vulnerable como lo son los niños de la primera infancia (0-5 años), mujeres en estado de embarazo y personas mayores (mayores a 65 años), que por su edad e incluso su estado de salud están permanentemente en sus hogares y en el sector teniendo una mayor exposición al contaminante (40).

Según la SDP para el 2014 se habla de aproximadamente de 88.221 personas en la localidad de Bosa, 150.599 en Kennedy, 52.826 en Fontibón, 131.750 en Engativá y 162.919 en Suba que pertenecen a los grupos etarios de menores de 5 años y mayores de 65, lo cual representa un gran número de habitantes expuestos tanto de manera aguda como crónica a las emisiones de $PM_{2.5}$. En el 2015 se tiene un aumento aproximado del 3 al 4% en la población perteneciente a estos grupos, lo que a su vez incrementa los costos de atención en salud derivados de las enfermedades cardiopulmonares generadas por la exposición al $PM_{2.5}$.

La implementación de tecnologías geoespaciales en el presente estudio, permitió visualizar de manera gráfica la distribución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la ciudad, lo que lo hace innovador puesto que fue una herramienta útil para relacionar cierto tipo de datos con localizaciones o ubicaciones de manera gráfica con el fin de responder preguntas o dar solución a algún problema sobre planificación, gestión y/o distribución territorial y/o de recursos, estos sistemas son utilizados en múltiples campos como lo son los estudios ambientales (39).

Existen diferentes estudios en el mundo que también han utilizado tecnologías espaciales mostrando las concentraciones anuales de contaminantes en países desarrollados y en desarrollo. Para 2014 la OMS realizó un mapa global de la exposición a $PM_{2.5}$, utilizando los datos de las redes de monitoreo de calidad del aire de las regiones de África, América Latina, América, el Mediterráneo Oriental, Europa, Sudoeste de Asia y Pacífico Occidental concluyendo que la contaminación atmosférica no solo tiene un origen en las actividades humanas, sino que puede tener una fuerte

influencia por causas naturales como los desiertos y las tormentas de polvo, como sucede en las zonas rurales de África y del Mediterráneo Oriental, donde la modelación muestra mayores concentraciones en estas zonas que en las urbanas; también se encontró que más del 92% de la población mundial se encuentra expuesta a niveles de $PM_{2.5}$ superiores a los valores GCA de la OMS (31). En Taiwán se han registrado concentraciones de $PM_{2.5}$ que superan los niveles de la OMS, especialmente en franjas horarias de 8 a 9 a.m. y de 2 a 3 p.m., atribuidas a las horas de mayor tráfico vehicular (32); en Cusco (Perú) se han registrado altas concentraciones en horas de la mañana con valores máximos de $35.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el 2010 (33); en ciudades de Italia como Milán, Roma y Génova que son altamente pobladas y con una amplia actividad industrial, también se han monitoreado y registrado altas concentraciones de $PM_{2.5}$ (34).

En Bogotá se han realizado estudios que utilizan mediciones y distribuciones tanto de PM_{10} como de $PM_{2.5}$ utilizando herramientas geoespaciales, pero el presente estudio es el primero en Bogotá que relaciona las mediciones de $PM_{2.5}$, con el riesgo de mortalidad por enfermedades cardiopulmonares derivado de la exposición de la población durante un periodo de tiempo de más de un año, además hacer una categorización por franjas horarias, lo que es un gran aporte para conocer cómo funciona la ciudad en términos de riesgo por contaminación de PM en diferentes momentos del día; adicionalmente se convierte en una herramienta que permite generar conocimiento, que al relacionarla con otras fuentes de información permitiría estimar las consecuencias en la salud de la población.

El uso de la relación de $PM_{2.5}/PM_{10}$ para complementar los datos de $PM_{2.5}$ contribuyó a fortalecer la calidad y robustez de los datos, cubriendo así los vacíos de los mismos en algunas estaciones, logrando de esta forma tener mayor representatividad en el tiempo, lo cual se tradujo en los mapas que se elaboraron.

Dentro de las debilidades del presente trabajo se evidencia que solo se trabajó con una serie de dos años, ya que inicialmente se tenía una base de datos muy amplia (2008 – 2015), pero al momento de depurar los datos pertinentes, se encontró que no todas las estaciones monitorean $PM_{2.5}$ y no se tenía una buena cobertura de la ciudad por parte de la RMCAB para este contaminante, por lo tanto se trabajó con solo dos años y 10 estaciones que reportan concentraciones de estos dos contaminantes, obteniendo información que permitiera tener mayor cobertura de la ciudad e información con una disponibilidad de registros horarios mayor al 75%.

CONCLUSIONES

Debido a las diferentes actividades comerciales e industriales en Bogotá, los mapas de riesgo permitieron evidenciar que las mayores distribuciones de $PM_{2.5}$ se dan en los rangos horarios de 6:00 a.m. - 12 p.m y 6:00 p.m. – 12:00 a.m (franja b y d, respectivamente), afectando principalmente las localidades de Fontibón, Bosa, Puente Aranda, Tunjuelito, Kennedy y parte de Suba, Engativá, Teusaquillo, Ciudad Bolívar, Rafael Uribe Uribe y Antonio Nariño, sin embargo Kennedy fue la localidad que en todas las franjas horarias se vio más afectada por tener las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ con mayor riesgo de mortalidad cardiopulmonar por la exposición crónica y aguda a este contaminante.

En esta localidad (Kennedy) se ven más afectadas las UPZ Castilla, Patio Bonito, Las Margaritas, Corabastos, Kennedy Central, Américas, Gran Britalia, Carvajal y Timiza que registraron concentraciones promedio en un rango de aproximadamente $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que al compararse con los valores guía sugeridos por la OMS en relación al promedio de 24 horas se ubican en el OI-3, donde la OMS establece que la

exposición a estos niveles incrementa de alrededor del 1,2% la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA; al comparar estas concentraciones con el valor promedio anual establecido por la OMS, estas se localizan en el OI-2, donde se establece que estos niveles representan una reducción de aproximadamente el 6% en el riesgo para la salud humana, con respecto al OI-1 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$), a pesar de que estas concentraciones tienen una reducción en el riesgo, no dejan de representar efectos adversos para la salud ante exposiciones prolongadas, afectando principalmente el sistema respiratorio y cardiovascular (11).

Teniendo en cuenta lo anterior se establece que de una población de 1.069.469 habitantes de la localidad de Kennedy se ven afectados por estos niveles de contaminación la mayor parte del día los menores de 5 años y los adultos mayores de 65, representando el 10.2% y 8.7% del total de la población de la localidad respectivamente, siendo grupos más vulnerables y susceptibles a la mortalidad y la morbilidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (35).

Por otro lado, se tienen zonas de la ciudad con bajas concentraciones, que al ser comparadas con el valor guía diario sugerido por la OMS, muestran que la mayor parte de la ciudad cumple con la GCA ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Sin embargo el panorama para el riesgo anual es diferente ya que solo en las franjas horarias a y c (12 a.m.- 6:00 a.m. y 12:00 p.m. – 6:00 p.m.) se cumple con el valor GCA ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en una parte de la zona oriental de la ciudad, abarcando parte de las localidades de Guaymaral, Usaquén, Chapinero, Santa Fe y San Cristóbal, indicando que estos valores son los mínimos en los que se observan efectos significativos en la salud humana, sin descartar que por debajo de estos niveles no se tengan efectos adversos en la salud, además de ser niveles de emisión que se pueden alcanzar en zonas urbanas con el fin de reducir los riesgos, especialmente de mortalidad cardiopulmonar (11).

Finalmente la elaboración de un mapa de riesgo en la mortalidad cardiopulmonar derivado a la exposición a $\text{PM}_{2.5}$ en Bogotá apoya la implementación de estrategias y planes que se tienen establecidos, tales como la política de prevención y control de la contaminación del aire que establece acciones como: “la promoción y coordinación de espacios de análisis de información intersectorial y comunitaria que permitan construir evidencia nacional para orientar de manera técnica y científica las diferentes políticas” (7).

También ayuda a que se adopten herramientas que apoyen la gestión de la calidad del aire a nivel local, como el *Plan decenal de descontaminación del aire para Bogotá 2010-2020* y la *Resolución conjunta 2410 de 2015*, por medio de la cual se establece el Índice Bogotano de Calidad del Aire –IBOCA– para la definición de niveles de prevención, alerta o emergencia por contaminación atmosférica en Bogotá D.C. y se toman otras determinaciones”, contribuyendo así con la sociedad capitalina y enmarcando el estudio dentro de las directrices de proyección social de la Universidad Santo Tomas.

El autor agradece a la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá por el suministro de los registros de la RMCAB utilizados en la presente investigación.

BIBLIOGRAFIA

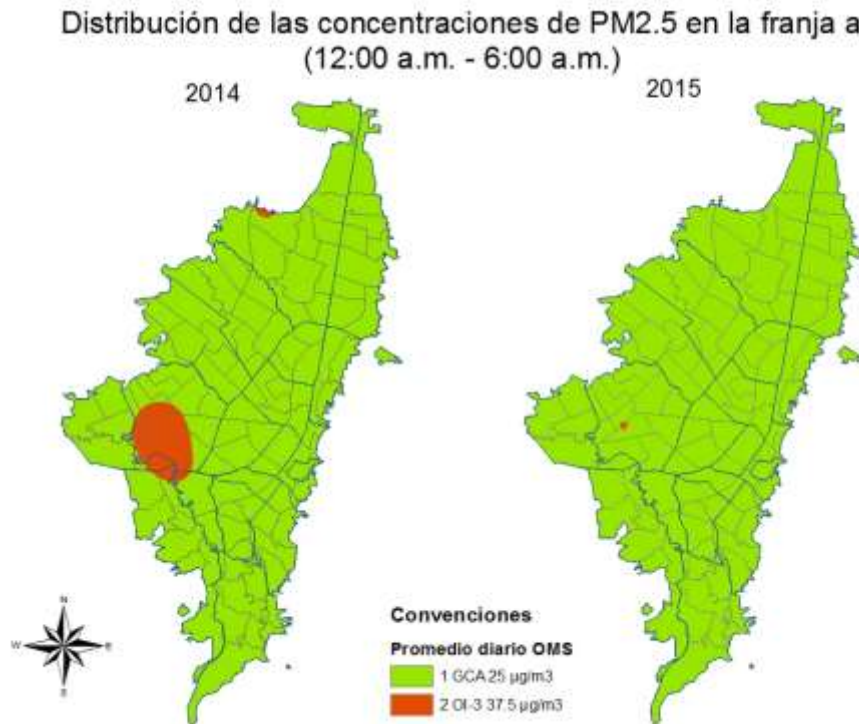
1. Cheng Z, Luo L, Wang S, Wang Y, Sharma S, Shimadera H, et al. Status and characteristics of ambient PM_{2.5} pollution in global megacities. *Environ Int* [Internet]. 2016;89–90:212–21. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.003>
2. Karagulian F, Belis CA, Francisco C, Dora C, Prüss-ustün AM, Bonjour S, et al. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM_{2.5}): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmos Environ* [Internet]. 2015;120:475–83. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>
3. Ministerio de Ambiente-Vivienda y Desarrollo Territorial. Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire. *Dir Desarro Sect Sosten*. 2010;1–50.
4. Vargas C. Efectos de la fracción gruesa (PM_{10-2.5}) del material particulado sobre la salud humana. *Revisión Bibliográfica*. Minsal. 2011;1–37.
5. De E, Manuel J, Calderón S, Torres OF. 2011 – 2015.
6. Arciniegas Suárez CA. Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM₁₀. *Luna Azul*. 2012;(34):195–213.
7. Ambiente M De, Transporte MDPS. Lineamientos Para La FormulaciÓN De La Política De PrevenciÓN Y Control De La ContaminaciÓN Del Aire. *Doc Conpes*. 2005;
8. Secretaría Distrital de Ambiente (SDA); Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Empresa de Transporte Tercer Milenio - Transmilenio S.A.; Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional Universidad de los Andes; Universidad de La Salle. Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá [Internet]. 2010. 324 p. Available from: http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886
9. Acevedo J, Boracejo J, Velásquez M. Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia. 2013;35.
10. SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Informe trimestral de la calidad del aire en Colombia. 2015;167.
11. Actualización mundial 2005. 2005;
12. Prato Sánchez DF. Modelación de la Dispersión de Material Particulado en Zona Minera del Cesar, Colombia, Usando FLUENT (CFD). 2012;79.
13. Garrido AP, Camargo Y. Partículas respirables en el aire: generalidades y monitoreo en Latinoamérica. *Rev INGE CUC*. 2012;8:293–312.
14. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Diagnostico nacional de salud ambiental. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf>. 2012;368.
15. Castro P, Vera J, Cifuentes L, Wellenius G, Verdejo H, Sepúlveda L, et al. Polución por material particulado fino (PM_{2.5}) incrementa las hospitalizaciones por insuficiencia cardiaca. *Rev Chil Cardiol* [Internet]. 2010 [cited 2017 Apr 17];29(3):306–14. Available from: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-85602010000300004&lng=en&nrm=iso&tlng=en
16. Romero-Lankao P, Qin H, Borbor-Cordova M. Exploration of health risks related to air pollution and temperature in three Latin American cities. *Soc Sci Med* [Internet]. 2013;83:110–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.socscimed.2013.01.009>
17. Rojas N, Galvis B. Relación entre PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Bogotá. *Rev Ing* [Internet]. 2005;22:54–60. Available from: <http://ucbconocimiento.ucbca.edu.bo/index.php/ran/article/viewFile/106/101>

18. Echeverri Londoño CA, Maya Vasco GJ. Relación entre las Partículas Finas (PM2.5) y Respirables (PM10) en la Ciudad de Medellín. *Rev Ing Univ Medellín* [Internet]. 2008;6(12):23–42. Available from: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=75061203>
19. Blanco-Becerra LC, Gáfarro-Rojas AI, Rojas-Roa NY. Influence of precipitation scavenging on the PM2.5/PM10 ratio at the Kennedy locality of Bogotá, Colombia. *Rev Fac Ing.* 2015;2015(76):58–65.
20. Larsen B. COLOMBIA COST OF ENVIRONMENTAL DAMAGE: A Socio-Economic and Environmental Health Risk. 2004;74.
21. Manual operativo para la utilización del sistema de información geográfica Quantum GIS 1 . 8.
22. Heyner M. Fernando Rodríguez Rodríguez. Aplicación de métodos de interpolación y modelamiento geoestadístico en la evaluación de la calidad del aire en Bogotá D.C. 2014;
23. Cely J, Siabato W, Sánchez Ipiá A, Rangel A. Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental. *UD y la Geomática* [Internet]. 2002;7 No.2:31–8. Available from: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/2815>
24. Ávila P, Rojas N. Análisis del origen de PM10 y PM2.5 en Bogotá gráficos polares. *Rev Mutis* [Internet]. 2016;(October). Available from: <http://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/view/1150>
25. Gaitán M, Cancino J, Behrentz E. Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Rev Ing Univ los Andes.* 2007;(26):81–92.
26. Raji B, Tenpierik MJ, Van Den Dobbelsteen A. The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2015;45:610–23. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011>
27. Mesa Ambiental de Cerros Orientales;, Procesos sociales y organizaciones de los Cerros Orientales;, Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente. *Cerros Orientales De Bogotá, Territorio Sostenible Y Patrimonio Ambiental.* 2006;1–34.
28. Secretaria Distrital de Ambiente. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. 2015;1–172. Available from: <https://www.google.com/search?q=ESTACIONES+DE+MONITOREO+DE+CONTAMINACIÓN+ATMOSFERICAS+EN+BOGOTA&ie=utf-8&oe=utf-8>
29. RMCAB. Informe anual de calidad del aire de Bogotá. 2014;195. Available from: <http://201.245.192.252:81/>
30. Mayor De Bogotá A, Peñalosa DCE, Ortiz Gómez A, José A, Arosemena A, Sisbén D, et al. Secretaría Distrital de Planeación Secretario Distrital de Planeación Subsecretario de Información y Estudios Estratégicos Directora Estudios Macro Oficina Asesora de Prensa y Comunicaciones. 2016; Available from: [http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/InformacionTomaDecisiones/Estadisticas/Bogot%E1 Ciudad de Estad%EDsticas/Tab/Caracterizaci%F3n Socioeconomica Sisben III 2016.pdf](http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/InformacionTomaDecisiones/Estadisticas/Bogot%E1%93%A1%20Ciudad%20de%20Estadisticas/Tab/Caracterizaci%C3%B3n%20Socioecon%C3%B3mica%20Sisben%20III%202016.pdf)
31. WHO_a. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease. 2016;
32. Lee CL, Huang HC, Wang CC, Sheu CC, Wu CC, Leung SY, et al. A new grid-scale model simulating the spatiotemporal distribution of PM2.5-PAHs for exposure assessment. *J Hazard Mater* [Internet]. 2016;314(April):286–94. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.047>
33. Pearce JL, Rathbun SL, Aguilar-Villalobos M, Naeher LP. Characterizing the spatiotemporal variability of PM2.5 in Cusco, Peru using kriging with external drift. *Atmos Environ* [Internet]. 2009;43(12):2060–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.060>

34. Righini G, Cappelletti A, Ciucci A, Cremona G, Piersanti A, Vitali L, et al. GIS based assessment of the spatial representativeness of air quality monitoring stations using pollutant emissions data. *Atmos Environ* [Internet]. 2014;97:121–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.015>
35. Men, Jimena M, Orozco B, Yovani E, Cristancho C, Biviana Z, et al. SECRETARIA Cristina Arango Olaya SUBSECRETARÍA DE INFORMACIÓN Y ESTUDIOS ESTRATÉGICOS CARTOGRAFÍA Y ESTADÍSTICA Sully Magalis Rojas Bayona Equipo Técnico Componente Cartográfico. Imprenta Nac [Internet]. 2011;32. Available from: https://www.ucatolica.edu.co/portal/con-nuestro-proyecto-yomasa-podremos-ayudar-en-otros-paises/%5Cnhttp://www.mineduacion.gov.co/1621/articles-160915_archivo_pdf.pdf
36. Tiempo C. La pequeña gran mentira de la contaminación en Bogotá [Internet]. *ElTiempo*. 2017 [cited 15 May 2017]. Available from: <http://www.eltiempo.com/bogota/contaminacion-en-bogota/16732774>
37. [Internet]. 2017 [cited 15 May 2017]. Available from: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Inversiones%20y%20finanzas%20pblicas/Bogot%C3%A1%2015.pdf>
38. Datos de Bogotá | Instituto Distrital de Turismo [Internet]. *Bogotaturismo.gov.co*. 2017 [cited 15 May 2017]. Available from: <http://www.bogotaturismo.gov.co/datos-de-bogota>
39. Que es un SIG? Ministerio de Educación Nacional de Colombia: [Internet]. *Mineduacion.gov.co*. 2017 [cited 15 May 2017]. Available from: <http://www.mineduacion.gov.co/1621/article-190610.html>
40. Mapa de Bogotá [Internet]. *Mapas.bogota.gov.co*. 2017 [cited 16 May 2017] Available from: <http://mapas.bogota.gov.co/>
41. Vista general del conjunto de herramientas de Densidad—Ayuda | ArcGIS Desktop [Internet]. *Pro.arcgis.com*. 2017 [cited 7 July 2017]. Available from: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-density-tools.htm>

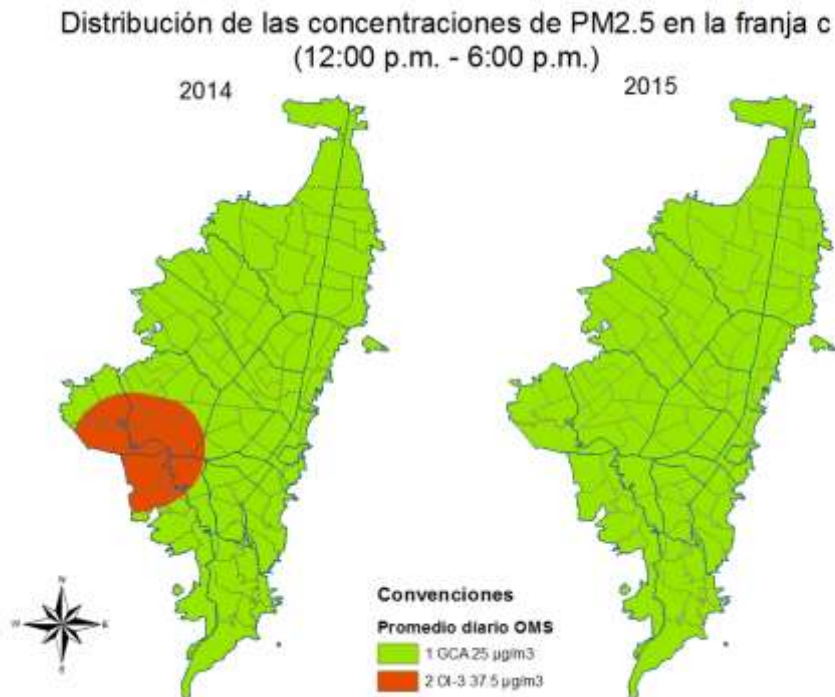
ANEXOS

Mapa 6. Distribución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la franja a. Promedio 24 horas. Zona urbana de Bogotá.



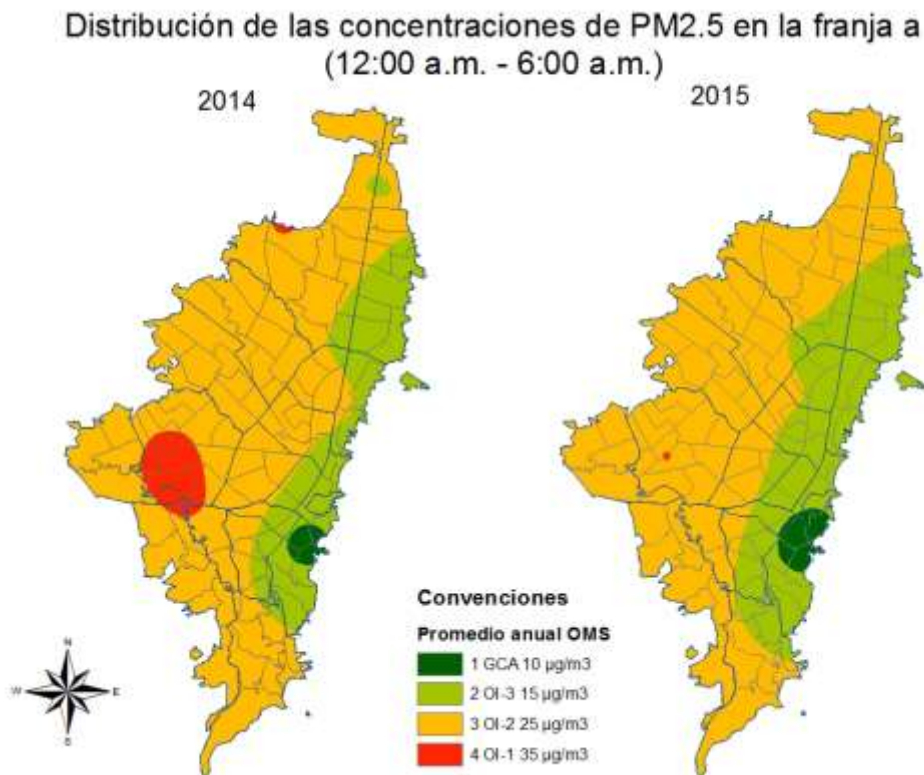
Fuente. El autor

Mapa 7. Distribución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la franja c. Promedio 24 horas. Zona urbana de Bogotá.



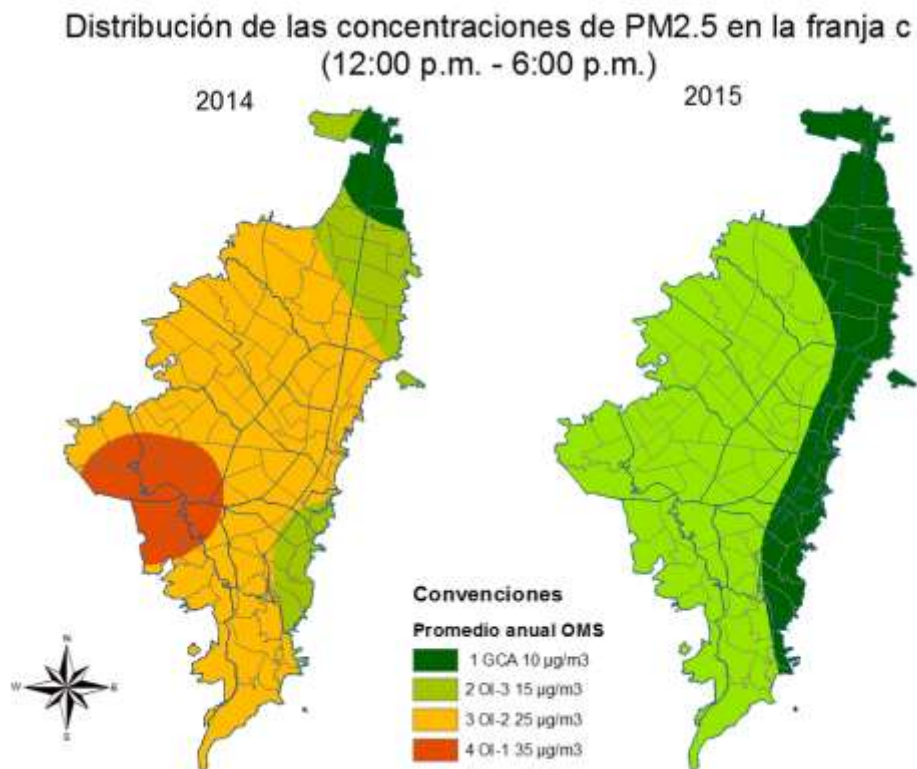
Fuente. El autor

Mapa 8. Distribución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la franja a. Promedio anual.
Zona urbana de Bogotá



Fuente. El autor

Mapa 9. Distribución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la franja c. Promedio anual.
Zona urbana de Bogotá



Fuente. El autor