



**Efectos de la contaminación del aire sobre la salud mental en Colombia**

**Autor**

**Miguelangel Ramirez Suarez**

**Trabajo presentado como requisito para optar por el  
título de Magíster en Economía**

**Director, Tutor**

**Paul Andrés Rodríguez Lesmes**

**Facultad de Economía**

**Maestría en Economía**

**Universidad del Rosario**

**Bogotá DC. - Colombia**

**2023**

## Resumen

Este documento analiza la relación entre los niveles de contaminación y la salud mental en niños en Colombia. Para el análisis se toma como variable de salud mental los resultados del cuestionario SDQ-Cas obtenidos del módulo niños de la ELCA 2016 de forma georreferenciada para las ciudades de Bogotá y Medellín, ciudades con una fuerte tradición industrial, se espera encontrar una relación entre los resultados de la prueba SDQ-Cas y los niveles de contaminación para las dos ciudades. Para la variable contaminación se toman mediciones diarias de los niveles de concentración en el aire de dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) para cada ciudad; sin embargo, como la variable contaminación es endógena, se construye un instrumento con inversiones térmicas. Los resultados muestran que las inversiones térmicas son un instrumento fuerte en la primera etapa y pequeños impactos de los niveles de contaminación sobre la salud mental en la segunda etapa, pero este resultado no se mantiene cuando se hacen chequeos de robustez. En conclusión, se encuentran indicios de algún efecto de la contaminación sobre la salud mental; no obstante, no se puede concluir de forma contundente la existencia de esta relación en los niños en Colombia.

Palabras Clave: Salud mental, contaminación, Bogotá, Medellín

Clasificación JEL: I12, I15, Q53

## Abstract

This document examines the relationship between pollution levels and mental health in children in Colombia. For the analysis, the mental health variable is taken as the results of the SDQ-Cas questionnaire obtained from the children's module of the 2016 ELCA (Longitudinal Study in Colombia) in a georeferenced manner for the cities of Bogotá and Medellín, cities with a strong industrial tradition. The expectation is to find a correlation between the SDQ-Cas test outcomes and pollution levels for both cities. For the pollution variable, daily measurements of nitrogen dioxide ( $NO_2$ ) and particulate matter ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) concentrations are taken for each city; however, since the pollution variable is endogenous, an instrument is constructed using thermal inversions. The results show that thermal inversions are a strong instrument in the first stage and indicate minor impacts of pollution levels on mental health in the second stage, but this result does not hold up under robustness checks. In conclusion, there are indications of some effects of pollution on mental health; however, the existence of this relationship in children in Colombia cannot be conclusively established.

Keywords: Mental health, pollution, Bogotá, Medellín

JEL Classification: I12, I15, Q53

## Contenido

1. Introducción.....	1
2. Marco Conceptual.....	3
3. Datos.....	6
4. Metodología.....	9
5. Resultados.....	11
5.1. Descripción de los datos.....	11
5.2. Resultados de la estimación.....	13
6. Discusión y Conclusiones.....	17
7. Referencias.....	19
8. Anexo.....	24

## Gráficas

Gráfica 1 Comportamiento de las inversiones térmicas y el nivel de contaminación.....	9
Gráfica 2 Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas.....	13
9. Gráfica 3 Histograma de datos faltantes.....	24
Gráfica 4: Mapa ubicación estaciones de medición de contaminación en Bogotá.....	24
Gráfica 5: Mapa ubicación estaciones de medición de contaminación en Medellín.....	25
Gráfica 6 Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas Bogotá-Medellín.....	25
Gráfica 7 Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas - Hiperactividad.....	27
Gráfica 8 Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas – Emocionales.....	27
Gráfica 9 Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas – Problemas con compañeros.....	28
Gráfica 10 Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas – Conducta.....	28
Gráfica 11 Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas – Prosocial.....	29

## Tablas

Tabla 1 Estadísticas Descriptivas.....	12
Tabla 2 Resultados primera etapa método IV.....	14
Tabla 3 Segunda etapa método IV.....	15
Tabla 4 Impacto del nivel de contaminación sobre las categorías del cuestionario SDQ-Cas.....	16
Tabla 5 Robustez del modelo.....	17

## 1. Introducción

Numerosos estudios han abordado la relación existente entre la salud física y la contaminación. No obstante, el estudio de la salud mental<sup>1</sup> y sus causas se ha vuelto relevante en investigaciones sociales y médicas al explicar fenómenos que la teoría tradicional no explica. En países de ingresos medios y bajos, los trastornos mentales<sup>2</sup> representan el 80% de la carga de enfermedades no mortales y, a nivel mundial, las pérdidas en productividad representan aproximadamente USD 1 billón al año (Torres de Galvis, 2018). Ante este panorama es importante preguntarse ¿cuál es el efecto de los contaminantes del aire en la salud mental?

Estudios recientes establecieron la relación causal entre contaminación y salud mental. Los contaminantes a través del sistema respiratorio ingresan al torrente sanguíneo hasta llegar al cerebro, estos contaminantes generan inflamación, estrés oxidativo sistémico o cerebral dañando la señalización de las citocinas cruciales en la regulación de las funciones cerebrales como el estado de ánimo (Sørensen et al., 2003; Calderon-Garcidueñas, 2003; MohanKumar et al., 2008; Salim et al., 2010 y Matarazzo et al., 2022). Asimismo, los efectos no son iguales para los diferentes grupos etarios poblacionales, las personas más vulnerables son los niños y los adultos mayores (Schwartz, 2004; Guxens & Sunyer, 2012 y Roberts et al., 2019).

En Colombia, según Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) entre los años 2011 -2015 las ciudades de Bogotá y Medellín tienen los puntos más contaminados en calidad del aire del país superando en numerosas ocasiones los niveles máximos permisibles<sup>3</sup>, estos niveles de contaminación son comparables con ciudades como Ciudad de México, Lima y Santiago de Chile, (Song et al., 2023 y Gouveina et al., 2021).

---

<sup>1</sup> En Colombia, el Artículo 3 de la Ley 1616 del 2013 define la salud mental como: Estado dinámico de la vida cotidiana (comportamiento e interacciones) que permite expresar emociones y habilidades cognitivas y mentales para establecer relaciones significativas y contribuir a la comunidad.

<sup>2</sup> El trastorno mental (enfermedad mental) se define como la afectación del pensamiento, percepciones, sentimientos, comportamientos y relaciones sociales; no son de corta duración, su intensidad es alta y puede coexistir como una mezcla de varios trastornos. Los problemas mentales son afectaciones del pensamiento, sentimiento, comportamiento y relación con las demás personas sin deteriorar la vida social; son de corta duración, menos severos y más comunes (Ministerio de Salud y Protección Social [Minsalud], 2015).

<sup>3</sup> Los límites máximos permisibles están establecidos en la Resolución 610 del 24 de marzo de 2010 del Ministerios de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial que modifica la Resolución 601 del 2006.

Sin perjuicio de lo anterior, la tasa de mortalidad relacionada con una prolongada exposición a niveles altos de contaminación del aire en el país representa el 8% del total de muertes (Instituto Nacional de Salud [INS], 2019) y, el deterioro en los niveles de calidad de aire incrementa las asistencias a los centros médicos en un 0.12% para niños en edades entre 1-5 años relacionados con problemas respiratorios (Quintero Forero, 2020).

Ahora bien, al momento de escribir este documento no se encuentran estudios sobre la relación entre contaminación y salud mental en Colombia. En América Latina hay estudios que hacen esta relación para países como México, Nicaragua, Chile, Perú y América Latina en general, mencionado a Colombia, pero no en profundidad (Song et al., 2023; Kahurana, Kumar y Gupta, 2023; Husaini, Reneau y Balam, 2022; Cao, Chen y McIntyre, 2021; Ramirez et al., 2020 y Aguillar, 2019). Este panorama motivó la siguiente pregunta de investigación ¿Cuál es el efecto de los contaminantes del aire en la salud mental en los niños y adolescentes en Colombia? Concretamente la hipótesis a evaluar es, un aumento de la concentración de los contaminantes en el aire afecta la salud mental en los niños y adolescentes en Colombia.

Se estima el efecto de un aumento en  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la concentración de los contaminantes  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  en el aire sobre los resultados del cuestionario SDQ-Cas, como variable de salud mental tomado del módulo niños de la Encuesta Longitudinal Colombiana de la Universidad de los Andes (ELCA) de forma georreferenciada para la ola 2016, junto a las mediciones de contaminación proveniente de 34 estaciones en Bogotá y Medellín.

El principal problema para identificar la relación es la endogeneidad de la contaminación, que se relaciona con factores de confusión como los ingresos y las condiciones económicas locales. Por ejemplo, los momentos de mayor contaminación pueden estar relacionados con picos en la actividad económica que a su vez aumenta los niveles de estrés que pueden ocasionar una mayor probabilidad de tener una enfermedad mental.

Para solucionar este problema se realiza una aproximación de Variable Instrumental (IV) usando como instrumento las inversiones térmicas, un fenómeno meteorológico natural e independiente de la actividad económica (exógeno) que afecta significativamente las concentraciones de contaminantes en el aire.

Los resultados no son concluyentes, pero muestran indicios de un efecto de los contaminantes en los resultados del cuestionario SDQ-Cas como variable de salud mental. Los resultados son significativos al 5% para la primera etapa donde se estima los efectos de las inversiones térmicas sobre los niveles de contaminación, el instrumento es fuerte con un valor F 33.26 para  $CO_2$ , 30.86 para  $PM_{10}$  y 35.26 para  $PM_{2.5}$ , asimismo cumple con los supuestos de relevancia y exogeneidad o restricción de exclusión. Las estimaciones no se mantienen cuando se aplica la prueba de robustez.

El documento se divide en esta primera parte introductoria, la segunda parte se expone el marco conceptual que relaciona los mecanismos y efectos de la contaminación en la salud mental. La tercera sección describe los datos, la cuarta sección se expone la aproximación metodológica usada, la quinta sección se presentan los resultados y la sexta se realiza la discusión y conclusiones.

## **2. Marco Conceptual**

El cuerpo humano necesita para su sobrevivencia inhalar constantemente oxígeno, el cual obtiene a través del aire. No obstante, el aire está compuesto de diferentes elementos, el oxígeno representa aproximadamente un 21% proporción muy superior a la requerida para la supervivencia humana, el porcentaje restante se divide en nitrógeno, cuya concentración representa el 78% y el 1% por diferentes elementos (Berger et al., 2022).

El desarrollo industrial, los procesos antropogénicos y otras actividades productivas humanas contribuyen en la emisión de sustancias potencialmente dañinas que afectan la composición del aire en dos dimensiones: primero, aumentos en los niveles relativos de concentración de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en el 1% del aire compuesto por diferentes elementos; segundo, generan emisión de otros elementos como material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), ozono ( $O_3$ ), entre otros, (Shihab, 2023 y Berger et al., 2022).

La presencia de estos contaminantes en el ambiente no solo afecta la calidad del aire, también representan un riesgo para la salud, (Mun & Cho, 2022). Según World Health Organization [WHO] (2021b) la calidad del aire se define como los niveles relativos de concentración de

contaminantes en el aire. Asimismo, la mala calidad del aire causa al año aproximadamente 4,2 millones de muertes prematuras en el mundo, de las cuales, el 91% se registran en países de ingresos medios y bajos relacionados con la exposición a material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , ([WHO], 2021a).

El material particulado es una mezcla de diferentes componentes como sulfatos, nitratos, amoníaco, cloruro de sodio, hollín, polvos minerales y agua cuya mezcla está suspendida en el aire y normalmente se divide en dos grupos, partículas finas, con diámetro menor o igual a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ); partículas ultrafinas, con diámetro igual o menor a 2.5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ ), WHO (2021a). El material particulado supone un problema real para la salud debido a que las partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se pueden alojar en los pulmones incluso atravesar la barrera pulmonar ingresando al torrente sanguíneo ocasionando enfermedades pulmonares crónicas, problemas cardíacos y cáncer, (Cox 2013 y Bodor & Bodor, 2022).

Existe una literatura bien documentada a nivel mundial que evidencia la relación existente entre una prolongada exposición a una mala calidad del aire y la aparición de enfermedades respiratorias y cardíacas para diferentes grupos etarios poblacionales (Veras et al., 2022; Chen, 2017; Sarmiento et al., 2015; Amorocho Barrera & Torres Chaves, 2013; Sunyer et al., 2003). Sin embargo, investigaciones médicas recientes encuentran una relación entre la mala calidad del aire y la aparición de enfermedades mentales ligado al desarrollo y deterioro neuropsicológico, como bien lo documentan Guxens y Sunyer (2012).

Los estudios iniciales realizados en animales evidenciaron afectaciones en el cerebro tanto en ratas como en perros jóvenes ante una prolongada exposición a partículas finas y ultrafinas en el aire, partículas que mayoritariamente son generadas por fuentes móviles como los vehículos con motor diésel (Levesque et al., 2011; Van Berlo et al., 2010; Gerlofs et al., 2010; Calderón et al., 2009; Campbell et al., 2009). Estos experimentos concluyeron que, los animales expuestos de forma prolongada a la contaminación presentaron una neuroinflamación que está estrechamente relacionada con la depresión, ansiedad, entre otros trastornos mentales, (Ehsanifar et al., 2019; Svensson et al., 2015).

En humanos, estudios recientes como los realizados por Chen et al. (2018), Roberts et al (2019) y Power et al (2015) establecen el mecanismo por el cual la contaminación del aire

afecta la salud mental. El aire contaminado induce a una inflamación y estrés oxidativo sistémico o cerebral, un efecto sumamente importante, ya que el estrés oxidativo daña la señalización de las citocinas que son un grupo de pequeñas proteínas y glucoproteínas cruciales en la regulación de las funciones cerebrales como, el crecimiento y la actividad de otras células del sistema inmunitario y sanguíneo al igual que los circuitos neuronales del estado de ánimo, (Sørensen et al., 2003; Calderon-Garcidueñas, 2003; MohanKumar et al., 2008; Salim et al., 2010 y Matarazzo et al., 2022).

El daño en la señalización de las citocinas está estrechamente relacionado con la depresión, ansiedad y difusión cognitiva, (Ramírez et al., 2019 y Salim et al., 2010). Sin embargo, es importante mencionar que la salud mental puede ser afectada por canales indirectos como el cambio conductual, por ejemplo, las personas consientes de los altos niveles de contaminación del aire dejan de hacer actividad física; una actividad que tiene efectos positivos en la salud mental o la preocupación generada por la posibilidad de tener una enfermedad física crónica por estar en un entorno altamente contaminado aumenta la probabilidad de generar ansiedad y depresión, (Chen et al., 2018).

Ahora bien, hasta el momento se ha evidenciado los mecanismos que relacionan la contaminación del aire con la salud mental. Sin embargo, los efectos no son iguales para los distintos rangos de edad en una misma población, incluso cuando esta población vive en entornos altamente contaminados. Los estudios realizados por Schwartz (2004) y Guxens y Sunyer (2012) encuentran que las personas más afectadas y por lo tanto más vulnerables a una exposición al aire contaminado son los niños y ancianos.

Los niños expuestos en edades tempranas presentan problemas de memoria, retraso de las habilidades motoras, menor volumen del cerebro y déficit cognitivo, (Hinman & Abraham, 2007; Calderón-Garcidueñas et al., 2014 y Ahmed et al., 2022). No obstante, es difícil identificar esta relación de causalidad en la población adulta mayor debido al deterioro natural del cerebro, (Chen et al., 2018).

En una evaluación realizada por Ahmed et al. (2022) en Australia usando una encuesta longitudinal, evidencia que los niños expuestos a un nivel moderado y alto de  $PM_{2.5}$  presentaron mayores probabilidades de tener problemas emocionales, comportamentales y

un retraso de habilidades motoras en comparación a su contra parte expuesta a niveles bajos de contaminación.

Un resultado similar encontró Roberts et al. (2019), en un estudio más amplio y en un periodo de exposición más largo para el Reino Unido usando también una encuesta longitudinal, pero para niños gemelos. Los resultados evidencian que los niños de 12 años expuestos a una baja calidad del aire no presentan las enfermedades comúnmente diagnosticadas a esa edad, pero sí aumenta la probabilidad de tener depresión en la adolescencia.

Como se mencionó anteriormente, las fuentes móviles son los mayores emisores de contaminación. La evidencia muestra que la baja exposición a estos contaminantes en la vida temprana de los niños cuyos hogares se encuentran cerca de una vía principal (menor a 200 metros), pueden presentar afectaciones negativas en las emociones y en el comportamiento, (Ahmed et al., 2022). Este resultado es muy importante ya que, en Colombia, por ejemplo, en el área metropolitana del Valle de Aburrá el 80% del  $PM_{2.5}$  es emitido por el parque automotor y el 20% restante por fuentes fijas (fabricas), (Alcaldía de Medellín, 2018). En base a lo anterior, se espera una relación entre contaminación y salud mental en los niños.

### **3. Datos**

Para responder la pregunta que motiva este estudio, se toman tres fuentes de datos. La primera es la Encuesta Longitudinal Colombiana de la Universidad de los Andes (ELCA) para el año 2016; no se toma la ola del año 2013 debido a que en ese año se aplicó el cuestionario edades y etapas socioemocionales (ASQ). El ASQ normalmente se aplica a niños en sus primeras etapas de crecimiento en comparación al cuestionario capacidades y dificultades (SDQ-Cas) aplicado en el 2016, que incluye dentro de su población adolescentes, (Baker et al., 2019; Gustafsson, Gustafsson y Proczkowska-Björklund, 2016; Toghyani et al, 2015; Kazerooni et al., 2014).

La ELCA contiene un total de 10.800 hogares visitados y encuestados, divididos en 6.000 urbanos y 4.800 rurales. La muestra es probabilística, estratificada, polietápica y de conglomerados, la selección de municipios se realiza bajo variables sociodemográficas y socioeconómicas. Para efectos de este estudio, se hace uso de la muestra de hogares urbanos,

en específico para las ciudades más contaminadas de Colombia, Bogotá y Medellín, (Gómez et al., 2016).

En los anexos se presenta el histograma de datos faltante de la ELCA usada para este estudio. Si bien muchas variables como migración se descartaron en este estudio por su alto índice de valores faltantes, las variables de interés como los resultados del cuestionario presentaron menos del 1% en valores faltantes respecto al total de datos. Ahora bien, la segunda fuente de información está relacionada con la medición de los niveles de contaminación del aire, se toman datos de contaminación<sup>4</sup> de  $NO_2$ ,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para 34 estaciones de monitorio de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ubicadas en 22 departamentos de Colombia, así como la red de medición ambiental de los entes locales.

Las estaciones de medición de contaminantes en el aire están distribuidas de tal forma que tiene una obertura de casi todo el territorio de las ciudades cubriendo las zonas industriales y principales avenidas con el propósito de tener una mejor medida de contaminación, esta distribución se puede ver de forma gráfica en los mapas de los anexos. Como las estaciones están georreferenciadas podemos generar una relación de distancia tomando la ubicación de los hogares a los cuales pertenecen los niños y adolescentes que respondieron el cuestionario SDQ-Cas. Sin embargo, por políticas de confidencialidad de la encuesta y con el propósito de proteger el anonimato de los hogares participantes en la ELCA no se puede presentar un mapa de relación entre las estaciones y los hogares.

Como la contaminación no es una variable exógena ya que esta correlacionado con la actividad económica, se realiza una aproximación por variable instrumental usando como instrumento las inversiones térmicas. Las inversiones térmicas es un fenómeno natural que se da cuando a medida que aumenta la altura la temperatura del aire se calienta, contrario a su comportamiento habitual de enfriamiento. Este aumento de temperatura genera una especie de red que captura y mantiene los contaminantes cerca al suelo generando así la variación exógena y, al ser un fenómeno natural no es explicado por la actividad económica.

---

<sup>4</sup> Para el estudio se toman como referencia esos contaminantes debido a que son los más comunes en las ciudades (Mun y Cho, 2023 y Liu et al., 2020)

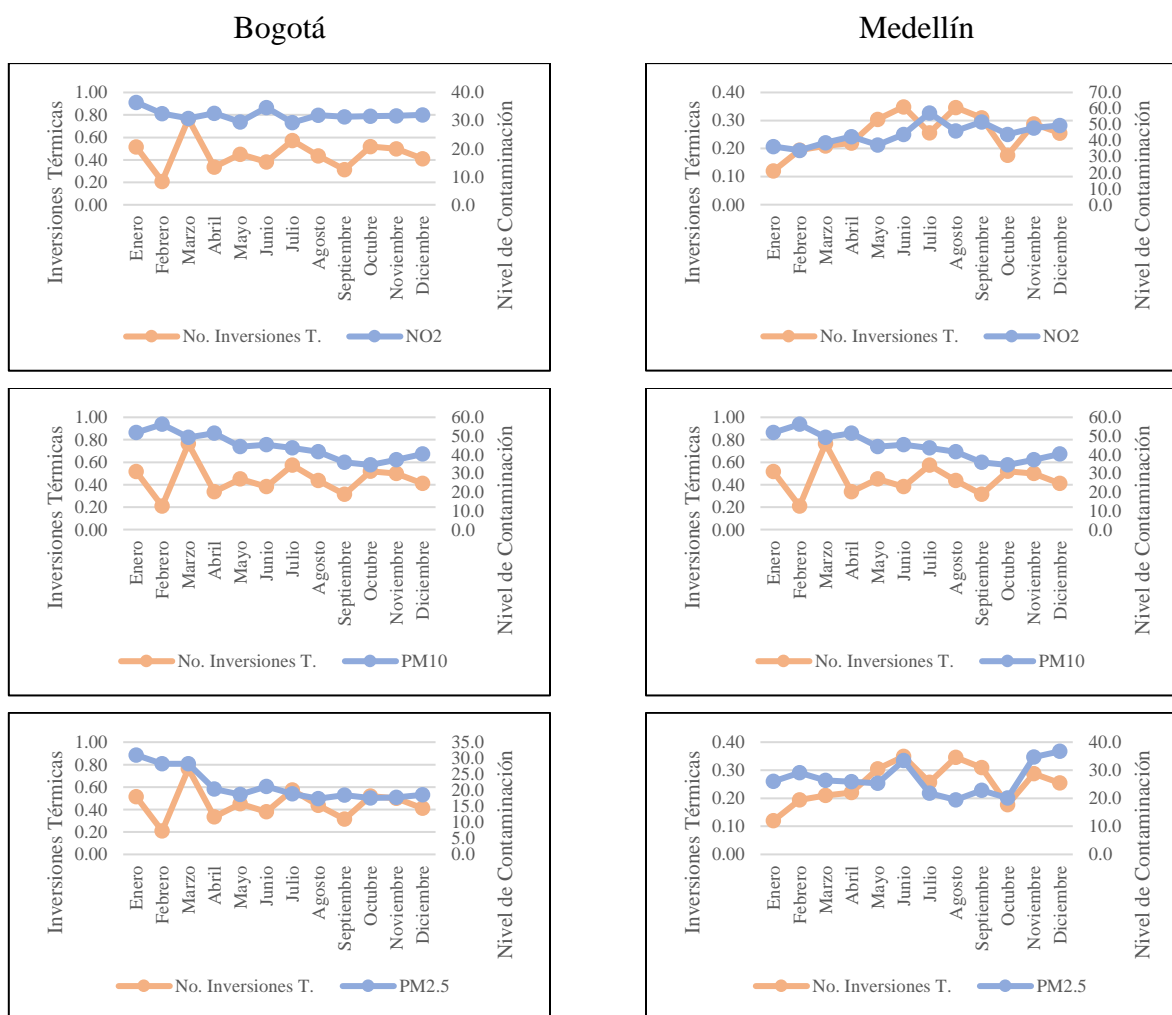
La tercera fuente se relaciona con la construcción de las inversiones térmicas como instrumento del IV. Para ello se usa el producto M216NPANA versión 5.12.4 del análisis retrospectivo de la era moderna para investigación y aplicaciones (MERRA-2 por sus siglas en inglés) publicado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA). Esta fuente de información fue usada también por Chen y Zhang (2018) como alternativa ante la imposibilidad de obtener información al respecto por las instituciones locales y nacionales.

El MERRA-2 divide la tierra en una cuadrícula de 0.5 x 0.625 grados, asimismo, reporta datos de temperatura para cada una de las 42 capas de presión al nivel del mar cada 6 horas. Se calcula la inversión térmica para Bogotá tomando la primera capa por encima a 100 metros y la segunda a 200 metros. En el caso de Medellín la primera capa por encima está a 90 metros y la segunda a 160 metros. Es importante aclarar que el cálculo de las inversiones tanto para la primera como para la segunda capa se realiza en base a la altura de la ciudad y no entre las dos capas mencionadas.

Así las cosas, el empalme entre la encuesta y las estaciones de monitoreo de contaminación se realiza usando como punto referente la estación de medición y generando una distancia a partir de esta, los hogares que estén dentro de estos radios de distancia serán los evaluados para la estimación a nivel ciudad. No obstante, se asocia la medición con la semana de la entrevista realizada a cada individuo.

La Gráfica 1 presenta de forma visual la relación existente entre los niveles de contaminación y las inversiones térmicas para las ciudades de Medellín y Bogotá. Se evidencia una correlación entre las dos variables, este comportamiento es importante ya que como se mencionó anteriormente una inversión térmica atrapa a nivel suelo los niveles de contaminación, la relación más estrecha se presenta con el  $PM_{2.5}$ . Es importante mencionar que en Colombia es normal que la mayor cantidad de inversiones térmicas se presentes en los primeros meses del año (enero - abril) y a mitad de año con más frecuencia en el mes de agosto. La información descrita se presenta la sección 5 a manera de estadísticas descriptivas y resultados de la estimación.

**Gráfica 1 Comportamiento de las inversiones térmicas y el nivel de contaminación**



Fuente: Elaboración propia.

#### 4. Metodología

Como medida de salud mental se usan los resultados del cuestionario SDQ-Cas desarrollado por Goodman en 1990 y que ha tenido una importante acogida en la evaluación de la salud mental en investigaciones para niños y adolescentes, (McEwen et al, 2021; Dahlberg et al., 2020 y Duinhof et al., 2020). El cuestionario se puede consultar en el módulo niños y niñas de la ELCA. Para efectos de este estudio, se usa el rango de los resultados de total dificultades

que va entre 0-32 siendo 0 normal y 32 anormal, un aumento en el resultado del SDQ-Cas representa un deterioro en la salud mental de los niños y adolescentes.

Como nuestra variable de contaminación es endógena, por tanto, no se puede garantizar per se la existencia de una fuente exógena que establezca relaciones causales, la aproximación con la que se buscará abordar la pregunta de interés se desarrollará en el marco de mínimos cuadrados en dos etapas (2SLS)- IV.

Se opta instrumentar nuestra variable de contaminación con las inversiones térmicas, fenómeno natural, como una fuente de variación exógena que cumple con las características necesarias de relevancia y exogeneidad. En secciones posteriores se ahondará el indispensable análisis sobre la validez del instrumento. A continuación, tenemos la especificación inicial:

$$SM_i = \beta_0 + \beta_1 NC_i + X_i' \gamma + \varepsilon_i \quad (1)$$

Donde nuestra variable de respuesta  $SM_i$  son los resultados de las pruebas SDQ-Cas. Por su parte,  $NC_i$  reporta el nivel de contaminación reportado por estación de medición. El vector de variables  $X_i' \gamma$  son variables de control dentro de las que se incluyen los siguientes controles de categoría; reporta tener una enfermedad crónica no respiratoria, enfermedad respiratoria, expuestos a violencia y condición de pobreza, se toman estos instrumentos dado que pueden afectar el deterioro de la salud mental. La variable  $\varepsilon_i$  es el término de error.

Dado que  $E(u) = 0$  y  $cov(X, u) = 0$ , pero  $cov(NC, u) \neq 0$ , es evidente que utilizar únicamente la especificación (1) no recupera el efecto causal y plantea un problema de consistencia en los estimadores, así que siguiendo con mínimos cuadrados en dos etapas (2SLS)- IV tenemos:

Definimos (2) cómo el primer paso de 2SLS.

$$NC_i = \alpha_0 + \alpha_1 IT_i + X_i' \gamma + u_i \quad (2)$$

En la ecuación (2) tenemos como variable de respuesta el nivel de contaminación por estación de medición en el barrio donde reside cada individuo en el periodo (día) entrevistado, en función del instrumento  $IT_i$ , los controles  $X_i' \gamma$  y el error  $u_i$ .

Esta es una especificación que relaciona o instrumenta el tratamiento con la ocurrencia de inversiones térmicas  $IT_i$ , que es nuestra fuente de variación exógena. De esta manera su ocurrencia puede llevar a que la contaminación aérea quede atrapada cerca del suelo con efectos nocivos para la salud.

El segundo paso, resulta de estimar el modelo (1) incorporando la estimación  $\widehat{IT}_{ict}$  en el cómputo, de esta manera si podemos recuperar el efecto causal. La forma reducida de nuestra especificación será entonces: reemplazado (2) en (1).

$$\begin{aligned}
 SM_i &= \beta_0 + \beta_1(\alpha_0 + \alpha_1 IT_i + X_i' \gamma + u_i) + X_i' \gamma + \varepsilon_i \\
 SM_i &= \beta_0 + \beta_1 \alpha_0 + \beta_1 \alpha_1 IT_i + \beta_1 X_i' \gamma + \beta_1 u_i + X_i' \gamma + \varepsilon_i \\
 SM_i &= \delta_0 + \delta_1 IT_i + \beta_1 X_i' \gamma + X_i' \gamma + \beta_1 u_i + \varepsilon_i \\
 SM_i &= \delta_0 + \delta_1 IT_i + X_i' \gamma (\beta_1 + 1) + U_i
 \end{aligned}$$

Dónde,  $\delta_0 = \beta_0 + \beta_1 \alpha_0$ ,  $\delta_1 = \beta_1 \alpha_1$ ,  $U_i = \beta_1 u_i + \varepsilon_i$ , en tanto  $\beta_1 + 1$  es el vector de estimadores asociados a los controles. De esta manera,  $\lambda_1$  recupera el efecto causal.

## 5. Resultados

En esta sección se presentan de forma descriptiva los datos, así como los resultados de la primera y segunda etapa de los resultados del modelo IV y la prueba de robustez que tiene como propósito evidenciar que tan fuerte son los resultados, es decir, si se mantienen a los cambios de altura en el cálculo de la inversión térmica.

### 5.1. Descripción de los datos

La Tabla 1 se presentan un resumen estadístico de la variable salud mental como de sus categorías, nivel de contaminación del aire y las inversiones térmicas. Para este estudio se tomó las ciudades de Bogotá y Medellín cuya población total en la ELCA modulo niños es de 621 individuos entre 5 a 16 años. Por ciudad, Bogotá tiene 497 individuos y Medellín 124 individuos con fecha de entrevista entre enero 2016 a noviembre de 2016.

Como se mencionó anteriormente; los resultados generales del cuestionario SDQ-Cas corresponde a un rango de 0-32 puntos con extremos 0 normal y 32 anormal, hay un punto de corte entre 14-15 que corresponde al límite entre lo normal y anormal. Asimismo, se

presenta un resumen estadístico de las categorías que corresponden al SDQ-Cas resaltando el comportamiento diferente para la categoría prosocial debido a que su rango se lee de forma inversa a las demás, es decir, si el individuo reporta una puntuación máxima de 10 es normal pero si reporta cero se considera un comportamiento anormal.

Las concentraciones de contaminación en promedio están por debajo de lo establecido por WHO que para  $PM_{2.5}$  es de  $25 \mu g/m^3$ ,  $PM_{10}$  es de  $50 \mu g/m^3$  y  $NO_2$  de 40 (WHO, 2005), sin embargo; los máximos evidencia que tanto en Bogotá como en Medellín se ha superado los límites establecidos por la WHO. Como se mencionó anteriormente, en los anexos se presenta un mapa con la distribución de las estaciones de medición en Bogotá, al momento de la solicitud de información de contaminación se cuenta con 21 estaciones que dan cobertura a la ciudad. Asimismo, también se presenta un mapa de la distribución de las 23 estaciones de medición tanto nacional como local para la ciudad de Medellín generando más cobertura en el centro de la ciudad. Por otro lado, los datos de la ELCA muestran también una buena cobertura para las ciudades.

**Tabla 1 Estadísticas Descriptivas**

<b>Salud Mental</b>	Unidad	Media	Desviación		
			Std	Min	Max
Total, Dificultades	0- Normal; 32-Anormal	9.34	5.64	0	32
Hiperactividad	0- Normal; 10-Anormal	3.69	2.64	0	10
Emociona	0- Normal; 10-Anormal	1.88	2.01	0	10
Prob. Compañeros	0- Normal; 10-Anormal	1.32	1.58	0	10
Conducta	0- Normal; 10-Anormal	2.34	1.80	0	10
Prosocial	0- Anormal; 10-Normal	8.65	1.65	0	10
<b>Contaminación del Aire</b>					
$NO_2$	$\mu g/m^3$	32.34	11.7	5.8	60.4
$PM_{10}$	$\mu g/m^3$	45.15	18.2	20.6	161
$PM_{2.5}$	$\mu g/m^3$	19.1	6.0	8.9	36.1
<b>Inversiones Térmicas</b>					
Inversión	Número	11.74	13.32	0	93
<b>Observaciones</b>	621				

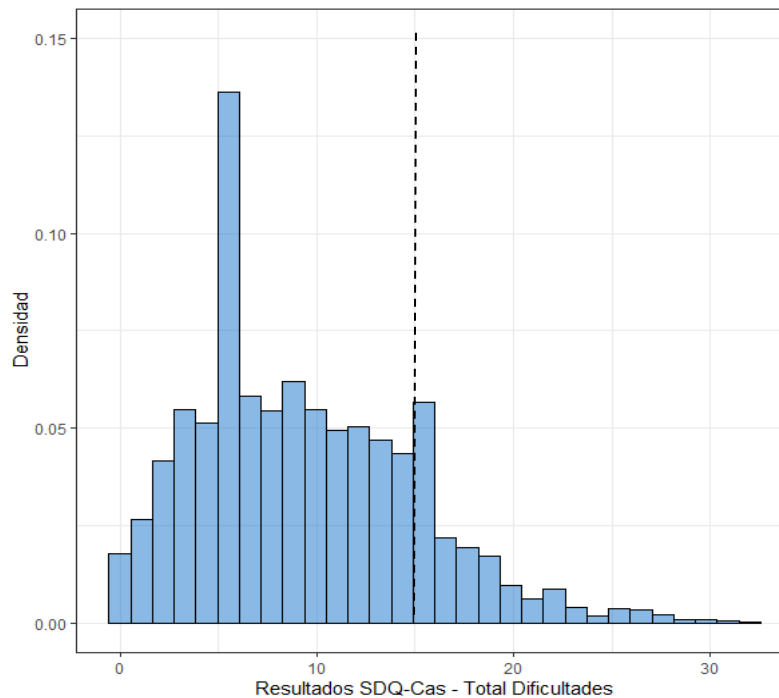
Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las inversiones térmicas, instrumento en el modelo, en promedio para el 2016 se presentaron 13.32 con un máximo de 93 las cuales se presenta en su mayoría en los

primeros meses del año, la Gráfica 1 presentada anteriormente, muestra la correlación entre los niveles de contaminación y las inversiones térmicas.

El comportamiento de la inversión térmica a inicios de año aumenta debido a los cambios de temperatura, en especial, por la disminución de esta, (Alcaldía de Bogotá, 2023). La Gráfica 2 muestra el histograma de densidad de los resultados generales del cuestionario SDQ-Cas para el total de la población con el punto de corte limite dentro de la escala. Si bien, gran parte de la población reporta resultados por debajo de ese límite aún hay existe un grupo que supera el límite del cuestionario presentando afectaciones en la salud mental.

**Gráfica 2** Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas



Fuente: Elaboración propia.

## 5.2. Resultados de la estimación

La Tabla 2 presenta los resultados de la ecuación 2 del modelo donde la variable dependiente es el nivel de contaminación por agente contaminante y, las covariables son las inversiones térmicas y todos los controles para las dos ciudades de estudio. Los resultados muestran que el instrumento es significativo con efectos positivos para los tres tipos de contaminante, es decir, cumple como el supuesto de relevancia que en la Gráfica 1 se podía intuir pero que ya con los resultados de la estimación de la ecuación 2 se puede afirmar.

Sin perjuicio de lo anterior, el instrumento al ser un evento natural no inducido por la actividad económica o humana no está correlacionada con el error, es decir, cumple con el supuesto de exogeneidad o restricción de exclusión. El modelo es significativo globalmente; no obstante, el valor del estadístico F de la regresión es muy bajo, así como el coeficiente de determinación; no obstante, según Stock, Wright y Yogo (2002) como el valor F es mayor a 10 se puede seguir con la estimación con un instrumento robusto, con este resultado, el instrumento cumple con los supuestos y parece ser fuerte. Una vez estimado la primera etapa se procede con la segunda etapa de la estimación; sin embargo, como el valor F es menor a 104.7 se debe ajustar los valores t, (Lee et al., 2022).

**Tabla 2 Resultados primera etapa método IV**

	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
<b>Panel A: Bogotá</b>	(1)	(3)	(5)
Inversiones Térmicas	0.04833** (0.01588)	0.04985*** (0.01590)	0.0024*** (0.0009)
R-squared	0.253	0.239	0.264
F-statistic	33.26	30.86	35.26
<b>Panel B: Medellín</b>			
Inversiones Térmicas	0.09961** (0.03346)	0.01036** (0.0034)	0.0183** (0.0055)
R-squared	0.521	0.533	0.468
F-statistic	25.69	26.98	20.73
Enfermedad Crónica	Si	Si	Si
Enfermedad Respiratoria	Si	Si	Si
Expuesto a violencia	Si	Si	Si
Pobreza	Si	Si	Si

\*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 presenta los resultados de la segunda etapa de la estimación del método IV, la columna llamada OLS presenta los resultados de la ecuación 1 por Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) y la columna IV presenta los resultados de la segunda etapa del método de variable instrumental ajustando el valor t y con ello los errores estándar. Cada columna muestra los resultados para cada ciudad y las filas los contaminantes previamente instrumentalizados para el caso del método IV.

Los resultados de la segunda etapa muestran que el dióxido de nitrógeno no tiene efectos sobre los resultados del cuestionario SDQ-Cas para ninguna de las dos ciudades, no obstante; los resultados son significativo tanto para  $PM_{10}$ , efectos pequeños, como para  $PM_{2.5}$ , efectos más grandes. El incremento  $1 \mu g/m^3$  en  $PM_{10}$ , ceteris paribus, me incrementa en 0.0775 unidades los resultados del SDQ-Cas para Bogotá y 0.10 para Medellín. Ahora bien, un incremento de  $1 \mu g/m^3$  en  $PM_{2.5}$ , ceteris paribus, me incrementa en 0.15 puntos para Bogotá y 0.10 puntos para Medellín.

**Tabla 3 Segunda etapa método IV**

Variable dependiente SDQ-Cas	Bogotá		Medellín	
	OLS	IV	OLS	IV
NO <sub>2</sub>	0.0012 (0.04795)	0.0518 (0.24665)	0.0125 (0.0092)	0.0148 (0.01424)
PM <sub>10</sub>	0.0012 (0.04795)	0.07746** (0.04280)	0.0636 (0.0480)	0.02531** (0.01371.)
PM <sub>2.5</sub>	- 0.0001 (0.04799)	0.1505** (0.08653)	0.1160 (0.0764)	0.1036** (0.04711)
F-statistic NO <sub>2</sub>	32.99	33.26	22.99	25.69
F-statistic PM <sub>10</sub>	26.94	30.86	24.00	26.98
F-statistic PM <sub>2.5</sub>	30.01	35.26	19.99	20.73
Observaciones	497	497	124	124
Enfermedad Cronica	Si	Si	Si	Si
Enfermedad Respiratoria	Si	Si	Si	Si
Expuesto a violencia	Si	Si	Si	Si
Pobreza	Si	Si	Si	Si

\*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados por OLS no muestran efectos significativos, incluso para el caso de Bogotá, en particular para el  $PM_{2.5}$  el signo es negativo, es decir, un aumento de los niveles de contaminación reduce los problemas mentales, evidencia de un sesgo dentro de la regresión que es corregido por los resultados de la segunda etapa del IV, una hipótesis de este resultado quizá puede ser explicado por los ingresos de la población.

En este punto es importante analizar el comportamiento de los niveles de contaminación contra las categorías del cuestionario SDQ-Cas con el propósito de evidencias que componente puede estar siendo afectado por el nivel de contaminación.

La Tabla 4 muestra los resultados para cada una de las categorías que componen el cuestionario, los resultados muestran que para el dióxido de nitrógeno en Bogotá y Medellín se ve afectado el componente de hiperactividad y, conducta solo para el caso de la capital. Para el  $PM_{10}$  los resultados muestran efectos para la categoría emocional para las dos ciudades, coherente con los encontrando en la literatura y, para la categoría conducta se ven pequeños efectos significativos en Bogotá. En el caso de  $PM_{2.5}$  se encuentran efectos pequeños en Medellín y Bogotá para la categoría emocional y solo para Bogotá en la categoría hiperactividad y prosocial.

**Tabla 4 Impacto del nivel de contaminación sobre las categorías del cuestionario SDQ-Cas**

	Categorías Cuestionario SDQ-Cas									
	Hiperactividad		Emocional		Prob. Compañeros		Conducta		Prosocial	
	Bog	Med	Bog	Med	Bog	Med	Bog	Med	Bog	Med
NO <sub>2</sub>	0.636* (0.273)	0.01399** (0.0050)	-0.02255 (0.01697)	0.0077 (0.0237)	0.0055 (0.01513)	0.0045 (0.0062)	0.0257 (0.1915)	0.08069* (0.0382)	-0.0663 (0.1729)	0.0006 (0.0381)
PM <sub>10</sub>	0.0033 (0.0075)	0.0049 (0.0245)	0.03636* (0.0181)	0.01488* (0.0066)	-0.00217 (0.0052)	-0.0001 (0.0108)	0.0039 (0.0053)	0.03427* (0.0146)	0.0090 (0.0106)	-0.0081 (0.0146)
PM <sub>2.5</sub>	0.08288*** (0.0232)	0.0469 (0.0389)	0.01292* (0.0058)	0.01492* (0.0076)	0.06137 (0.1603)	0.0157 (0.01719)	0.0154 (0.0183)	0.0288 (0.0237)	0.03386* (0.0165)	0.0034 (0.0303)
F-statistic NO <sub>2</sub>	36.25	26.95	36.17	17.32	36.11	19.11	36.23	20.73	36.42	26.70
F-statistic PM <sub>10</sub>	36.29	25.94	36.19	16.88	36.18	26.51	34.25	26.98	35.23	26.98
F-statistic PM <sub>2.5</sub>	36.23	21.73	36.20	19.86	36.16	31.96	35.31	25.69	36.21	23.90
Observaciones	483	122	483	122	483	122	483	122	483	122
Enfermedad Cronica	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Enfermedad Respiratoria	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Expuesto a violencia	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Pobreza	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

\*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1.

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados encontrados en la Tabla 4 muestra de alguna forma evidencia débil con impactos pequeños, posiblemente por la porque los efectos ya están presentes. Por esta razón se realiza un testeo de robustez al modelo calculando inversiones térmicas a 300 metros (iniciales 200 metros) para Bogotá y Medellín con el propósito de capturar una mayor concentración en los niveles de contaminación y determinar si los resultados se mantienen.

La Tabla 5 presenta los resultados de la prueba de robustez al modelo al incrementar la altura de cálculo de las inversiones térmicas. Los resultados solo se mantienen para  $PM_{2.5}$  Bogotá, el dióxido de nitrógeno para las dos ciudades, es decir, el dióxido de nitroso no parece tener efecto alguno sobre la salud mental de los niños y adolescentes y, los efectos del  $PM_{10}$  desaparecen mostrando resultados débiles para este estudio.

**Tabla 5 Robustez del modelo**

	Bogotá	Medellín
<b>Panel A: IV</b>	SDQ-Cas	SDQ-Cas
NO <sub>2</sub>	0.00967 (0.0154)	0.0092 (0.0301)
PM <sub>10</sub>	0.007035 (0.09024)	0.0075 (0.0594)
PM <sub>2.5</sub>	0.0151* (0.0074)	0.0236 (0.099)
Observaciones	497	124
F-statistic NO <sub>2</sub>	34.17	28.08
F-statistic PM <sub>10</sub>	32.86	27.32
F-statistic PM <sub>2.5</sub>	37.56	23.54

Fuente: Elaboración propia.

## 6. Discusión y Conclusiones

Este estudio pretende encontrar evidencia que un aumento de los niveles de contaminación expuestos afecta la salud mental en Colombia. Los resultados no son concluyentes, muestran un efecto de los niveles de contaminación  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  sobre los resultados del cuestionario SDQ-Cas que se toma como indicador de salud mental y, ningún efecto del  $NO_2$  para las dos ciudades sobre resultados del cuestionario.

El instrumento demostró ser fuerte en la primera etapa de la estimación IV y de forma gráfica estar correlacionado con los niveles de contaminación, es decir, un aumento en el número de inversiones térmicas afecta significativamente los niveles de contaminación de forma positiva como lo resalta la literatura y se espera que suceda. Sin embargo, los resultados de la segunda etapa como el desagregados por categoría muestra impactos pequeños que no se mantienen cuando se hace la prueba de robustez.

Sin perjuicio de lo anterior, parece haber incididos que puede existir un efecto de la contaminación sobre la salud mental, no obstante; no se puede concluir de forma clara que los niveles de contaminación afecten la salud mental en las ciudades analizadas. Es posible que los niveles de contaminación sean altos para empezar y los efectos grandes ya están por verse; al comparar con la literatura internacional los resultados son bajos.

Queda como agenda de investigación introducir en el estudio controles como precipitaciones debido a que las lluvias bajan a nivel piso los niveles de contaminación y, la velocidad del aire que es un factor determinante en el movimiento de la contaminación de un lugar a otro, así como, testear si la altura de la estación de medición de contaminación afecta las medidas capturadas introduciendo un sesgo de medición al no capturar los niveles de contaminación a nivel piso.

## 7. Referencias

Ahmed, S. M., Mishra, G. D., Moss, K. M., Yang, I. A., Lycett, K., & Knibbs, L. D. (2022). Maternal and Childhood Ambient Air Pollution Exposure and Mental Health Symptoms and Psychomotor Development in Children: An Australian Population-Based Longitudinal Study. *Environment international*, 158, 107003.

Alcaldía de Bogotá, (2023). “Nata” de contaminación: fenómeno de inversión térmica que se presenta en Bogotá. Disponible en: <https://acortar.link/arhSsqo>

Alcaldía de Medellín- (2018). Pacto por la calidad del aire. <https://bit.ly/3939Cr9>

Amorocho Barrera, J., & Torres Chaves, M. C. (2013). Asociación de la concentración de material particulado en Bogotá con infarto agudo de miocardio (Doctoral dissertation, Universidad del Rosario).

Baker, A., Simon, N., Keshaviah, A., Farabaugh, A., Deckersbach, T., Worthington, JJ, ... y Pollack, MP (2019). Cuestionario de síntomas de ansiedad (ASQ): desarrollo y validación. *Psiquiatría general*, 32 (6).

Berger, C., Mahdavi, A., Azar, E., Bandurski, K., Bourikas, L., Harputlugil, T., Hellwing, R. T., Rupp, R. F. & Schweiker, M. (2022). Reflections on the Evidentiary Basis of Indoor Air Quality Standards. *Energies*, 15(20), 7727.

Bodor, K., Szép, R., & Bodor, Z. (2022). The human health risk assessment of particulate air pollution (PM2.5 and PM10) in Romania. *Toxicology Reports*, 9, 556-562.

Brito-Aguilar, R. (2019). Dementia around the world and the Latin America and Mexican scenarios. *Journal of Alzheimer's Disease*, 71(1), 1-5.

Calderon-Garcidueñas, L., Maronpot, R. R., Torres-Jardon, R., Henriquez-Roldan, C., Schoonhoven, R., Acuna-Ayala, H., Villarreal-Calderon, A., Nakamura, J., Fernando, R., Reed, W., et al. (2003). Dna damage in nasal and brain tissues of canines exposed to air pollutants is associated with evidence of chronic brain inflammation and neurodegeneration. *Toxicologic pathology*, 31(5):524–538.

Calderón-Garcidueñas, L., Mora-Tiscareño, A., Gómez-Garza, G., Carrasco-Portugal, M. D. C., Pérez-Guillé, B., Flores-Murrieta, F. J., ... & Maronpot, R. R. (2009). Effects of a cyclooxygenase-2 preferential inhibitor in young healthy dogs exposed to air pollution: a pilot study. *Toxicologic pathology*, 37(5), 644-660.

Calderón-Garcidueñas, L., Torres-Jardón, R., Kulesza, R. J., Park, S. B., & D'Angiulli, A. (2014). Air pollution and detrimental effects on children's brain. The need for a multidisciplinary approach to the issue complexity and challenges. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 613.

- Campbell, A., Araujo, J. A., Li, H., Sioutas, C., & Kleinman, M. (2009). Particulate matter induced enhancement of inflammatory markers in the brains of apolipoprotein E knockout mice. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 9(8), 5099-5104.
- Cao, B., Chen, Y., & McIntyre, R. S. (2021). Comprehensive review of the current literature on impact of ambient air pollution and sleep quality. *Sleep medicine*, 79, 211-219.
- Chen, S., Oliva, P., & Zhang, P. (2018). Air pollution and mental health: evidence from China (No. w24686). National Bureau of Economic Research.
- Chen, X. (2017). Effect of particulate air pollution on coronary heart disease in China: Evidence from threshold GAM and Bayesian hierarchical model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 101, 35-42.
- Congreso de Colombia. (2013, 21 de enero). Ley de Salud Mental. Diario Oficial No. 48.680
- Cox Jr, L. A. (2013). Caveats for causal interpretations of linear regression coefficients for fine particulate (PM<sub>2.5</sub>) air pollution health effects. *Risk analysis*, 33(12), 2111-2125.
- Dahlberg, A., Fält, E., Sarkadi, A., Fabian, H., & Salari, R. (2020). Strengths and Difficulties Questionnaire (SDQ) as an assessment tool for measuring emotional and behavioral problems in young children. *European Journal of Public Health*, 30(Supplement\_5), ckaa165-418.
- Duihnof, E. L., Lek, K. M., De Looze, M. E., Cosma, A., Mazur, J., Gobina, I., ... & Stevens, G. W. J. M. (2020). Revising the self-report strengths and difficulties questionnaire for cross-country comparisons of adolescent mental health problems: the SDQ-R. *Epidemiology and psychiatric sciences*, 29, e35.
- Ehsanifar, M., Tameh, A. A., Farzadkia, M., Kalantari, R. R., Zavareh, M. S., Nikzaad, H., & Jafari, A. J. (2019). Exposure to nanoscale diesel exhaust particles: Oxidative stress, neuroinflammation, anxiety and depression on adult male mice. *Ecotoxicology and environmental safety*, 168, 338-347.
- Gerlofs-Nijland, M. E., van Berlo, D., Cassee, F. R., Schins, R. P., Wang, K., & Campbell, A. (2010). Effect of prolonged exposure to diesel engine exhaust on proinflammatory markers in different regions of the rat brain. *Particle and fibre toxicology*, 7(1), 1-10.
- Gouveia, N., Kephart, J. L., Dronova, I., McClure, L., Granados, J. T., Betancourt, R. M., ... & Diez-Roux, A. V. (2021). Ambient fine particulate matter in Latin American cities: Levels, population exposure, and associated urban factors. *Science of the Total Environment*, 772, 145035.
- Gustafsson, B. M., Gustafsson, P. A., & Proczkowska-Björklund, M. (2016). The Strengths and Difficulties Questionnaire (SDQ) for preschool children—a Swedish validation. *Nordic journal of psychiatry*, 70(8), 567-574.
- Guxens, M., & Sunyer, J. (2012). A review of epidemiological studies on neuropsychological effects of air pollution. *Swiss Medical Weekly*, (1).

Hinman, J. D., & Abraham, C. R. (2007). What's behind the decline? The role of white matter in brain aging. *Neurochemical research*, 32(12), 2023-2031.

Husaini, DC, Reneau, K. y Balam, D. (2022). Contaminación del aire y salud pública en América Latina y el Caribe (ALC): una revisión sistemática con metanálisis. *Revista Universitaria Beni-Suef de Ciencias Básicas y Aplicadas*, 11 (1), 122.

Instituto de Hidrología, Metrología y Estudios Ambientales (2016). Bogotá y Medellín tienen los puntos más contaminados en calidad de aire de Colombia.

Instituto Nacional de Salud. (2019). Informe carga de enfermedad ambiental en Colombia.

Kazerooni, S., Keshavarz, K., Abasi, R., Zoladl, M., Asadi, S. H., Sharafieyan, C., ... & REZAKHANI, A. (2014). Status of development of premature children from 4 to 12 months in the neonatal intensive care unit (NICU) admission based on the ASQ questionnaire.

Khurana, R., Kumar, N., & Gupta, L. (2023). Air Pollution as a Risk for Mental Health Problems: An Exploratory Study of Direct and Indirect Pathways. *European Economic Letters (EEL)*, 13(5), 131-141.

Levesque, S., Taetzsch, T., Lull, M. E., Kodavanti, U., Stadler, K., Wagner, A., ... & Block, M. L. (2011). Diesel exhaust activates and primes microglia: air pollution, neuroinflammation, and regulation of dopaminergic neurotoxicity. *Environmental health perspectives*, 119(8), 1149-1155.

Liu, YS, Cao, Y., Hou, JJ, Zhang, JT, Yang, YO y Liu, LC (2020). Identificar rutas comunes de emisiones de CO2 y contaminantes atmosféricos en China. *Revista de Producción Más Limpia*, 256, 120599.

Matarazzo, L., Santana, Y. E. H., Walsh, P. T., & Fallon, P. G. (2022). The IL-1 cytokine family as custodians of barrier immunity. *Cytokine*, 154, 155890.

McEwen, F., Moghames, P., Bosqui, T., Kyrillos, V., Chehade, N., Saad, S., ... & Pluess, M. (2021). Validating screening questionnaires for internalizing and externalizing disorders against clinical interviews in 8 to 17-year-old Syrian Refugee Children.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Resolución 610 por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006.

Ministerio de Salud y Protección Social. (2015). ABC Encuesta Nacional de Salud Mental 2015.

MohanKumar, S. M., Campbell, A., Block, M., and Veronesi, B. (2008). Particulate matter, oxidative stress and neurotoxicity. *Neurotoxicology*, 29(3):479-488.

Mun, E., & Cho, J. (2022). Review of Internet of Things-Based Artificial Intelligence Analysis Method through Real-Time Indoor Air Quality and Health Effect Monitoring: Focusing on Indoor Air Pollution That Are Harmful to the Respiratory Organ. *Tuberculosis and Respiratory Diseases*, 86(1), 23-32.

- Mun, E., & Cho, J. (2023). Review of Internet of Things-Based Artificial Intelligence Analysis Method through Real-Time Indoor Air Quality and Health Effect Monitoring: Focusing on Indoor Air Pollution That Are Harmful to the Respiratory Organ. *Tuberculosis and Respiratory Diseases*, 86(1), 23.
- Power, M. C., Kioumourtzoglou, M.-A., Hart, J. E., Okereke, O. I., Laden, F., and Weisskopf, M. G. (2015). The relation between past exposure to fine particulate air pollution and prevalent anxiety: observational cohort study. *bmj*, 350:h1111.
- Quintero Forero, J. M. (2020). ¿Cuál es la relación existente entre las concentraciones de material particulado y las admisiones a centros médicos por enfermedades respiratorias agudas en Bogotá? (Doctoral dissertation, Maestría en economía de las políticas públicas).
- Ramírez-Jirano, L. J., Velasco-Ramírez, S. F., Pérez-Carranza, G. A., Domínguez-Díaz, C., & Bitzer-Quintero, O. K. (2019). Cytokines and nervous system: relationship with schizophrenia. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 57(2), 107-112.
- Ramírez-Santana, M., Zúñiga-Venegas, L., Corral, S., Roeleveld, N., Groenewoud, H., Van der Velden, K., ... & Pancetti, F. (2020). Association between cholinesterase's inhibition and cognitive impairment: a basis for prevention policies of environmental pollution by organophosphate and carbamate pesticides in Chile. *Environmental research*, 186, 109539.
- Rinholm, J. E., & Bergersen, L. H. (2014). White matter lactate—does it matter?. *Neuroscience*, 276, 109-116.
- Roberts, S., Arseneault, L., Barratt, B., Beevers, S., Danese, A., Odgers, C. L., ... & Fisher, H. L. (2019). Exploration of NO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> air pollution and mental health problems using high-resolution data in London-based children from a UK longitudinal cohort study. *Psychiatry research*, 272, 8-17.
- Salim, S., Asghar, M., Chugh, G., Taneja, M., Xia, Z., and Saha, K. (2010). Oxidative stress: a potential recipe for anxiety, hypertension and insulin resistance. *Brain research*, 1359:178–185.
- Sapag, J. C., Rush, B., & Barnsley, J. (2015). Evaluation dimensions for collaborative mental health services in primary care systems in Latin America: results of a Delphi group. *Administration and Policy in Mental Health and Mental Health Services Research*, 42, 252-264.
- Sarmiento, R., Hernández, L. J., Medina, E. K., Rodríguez, N., & Reyes, J. (2015). Síntomas respiratorios asociados con la exposición a la contaminación del aire en cinco localidades de Bogotá, 2008-2011, estudio en una cohorte dinámica. *Biomédica*, 35(2), 167-176.
- Schwartz, J. (2004). Air pollution and children's health. *Pediatrics*, 113(Supplement\_3), 1037-1043.
- Shihab, A. S. (2023). Assessment of Air Quality through Multiple Air Quality Index Models—A Comparative Study. *Journal of Ecological Engineering*, 24(4), 110-116.

Song, J., Wang, Y., Zhang, Q., Qin, W., Pan, R., Yi, W., ... & Su, H. (2023). Premature mortality attributable to NO<sub>2</sub> exposure in cities and the role of built environment: A global analysis. *Science of The Total Environment*, 866, 161395.

Sørensen, M., Daneshvar, B., Hansen, M., Dragsted, L. O., Hertel, O., Knudsen, L., and Loft, S. (2003). Personal pm<sub>2.5</sub> exposure and markers of oxidative stress in blood. *Environmental Health Perspectives*, 111(2):161–166.

Stock, J. H., Wright, J. H., & Yogo, M. (2002). A survey of weak instruments and weak identification in generalized method of moments. *Journal of Business & Economic Statistics*, 20(4), 518-529.

Sunyer, J., Ballester, F., Tertre, A. L., Atkinson, R., Ayres, J. G., Forastiere, F., Forsberg, B., Vonk, J. M., Bisanti, L., Tenías, J. G., Medina, S., Schwartz, J. & Katsouyanni, K. (2003). The association of daily sulfur dioxide air pollution levels with hospital admissions for cardiovascular diseases in Europe (The Aphae-II study). *European heart journal*, 24(8), 752-760.

Svensson, M., Lexell, J., & Deierborg, T. (2015). Effects of physical exercise on neuroinflammation, neuroplasticity, neurodegeneration, and behavior: what we can learn from animal models in clinical settings. *Neurorehabilitation and neural repair*, 29(6), 577-589.

Toghyani, R., Shorabi, FS, Shorabi, HS y Tabrizi, SG (2015). Verifique el estado de desarrollo de los niños menores de 5 años en las zonas rurales de Isfahan utilizando el cuestionario ASQ en el año 2012-2013. *Revista de medicina y vida*,8(Spec Iss 4), 169.

Torres de Galvis, Y. (2018). Costos asociados con la salud mental. *Revista Ciencias de la salud*, 16(2), 182-187.

Van Berlo, D., Albrecht, C., Knaapen, A. M., Cassee, F. R., Gerlofs-Nijland, M. E., Kooter, I. M., ... & Schins, R. P. (2010). Comparative evaluation of the effects of short-term inhalation exposure to diesel engine exhaust on rat lung and brain. *Archives of toxicology*, 84(7), 553-562.

Veras, M. M., Farhat, S. C., Rodrigues, A. C., Waked, D., & Saldiva, P. H. (2022). Beyond respiratory effects: Air pollution and the health of children and adolescents. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 100435.

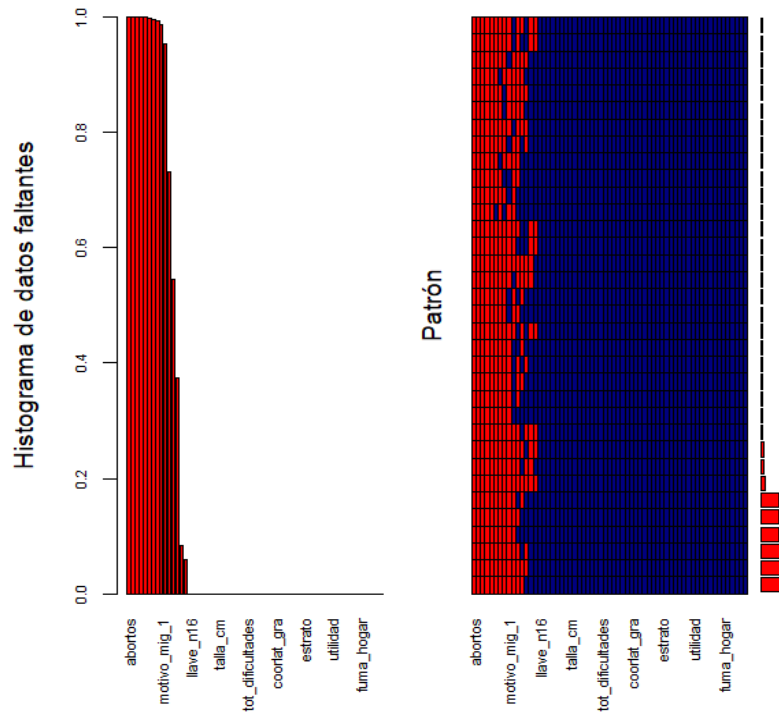
WHO. 2005. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen, dioxide, and sulfur dioxide. Disponible en <https://acortar.link/OMREqj>.

World Health Organization. (2021a). Ambient (outdoor) air pollution. <https://bit.ly/3OZnSBE>

World Health Organization. (2021b). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary.

8. Anexo

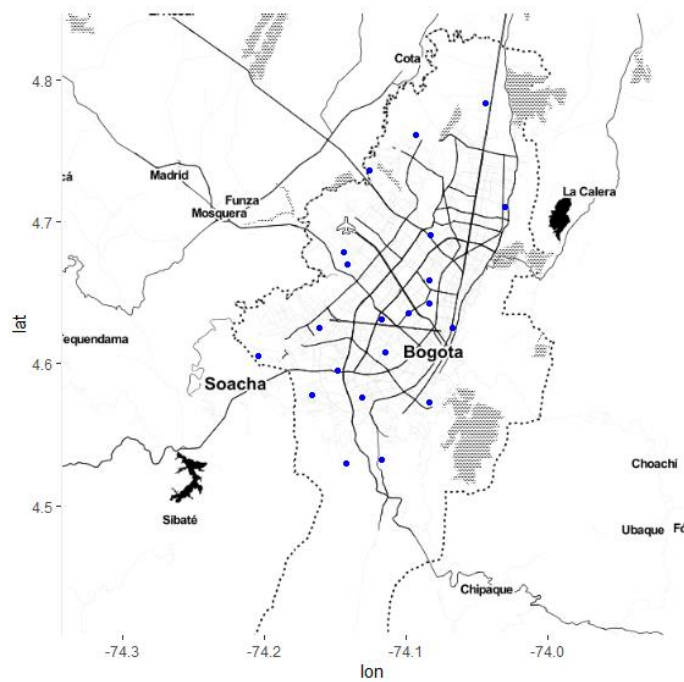
Gráfica 3 Histograma de datos faltantes.



9.

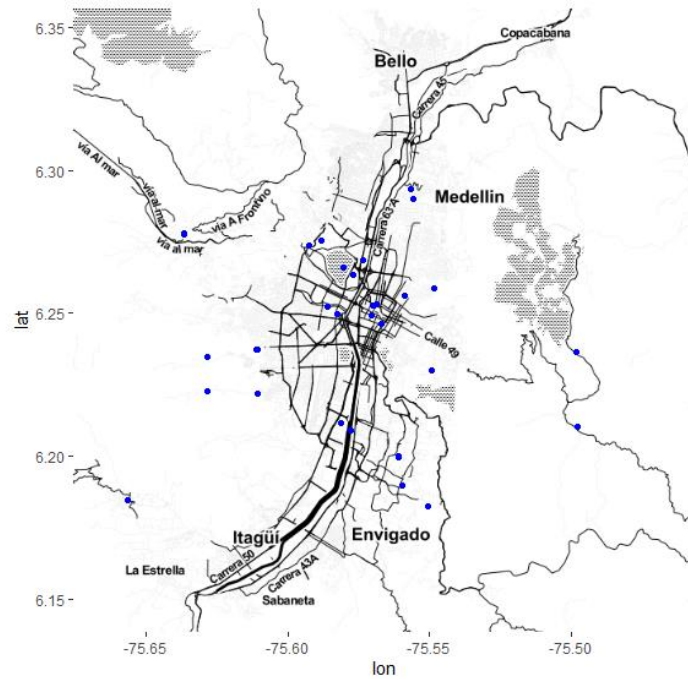
10. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 4: Mapa ubicación estaciones de medición de contaminación en Bogotá



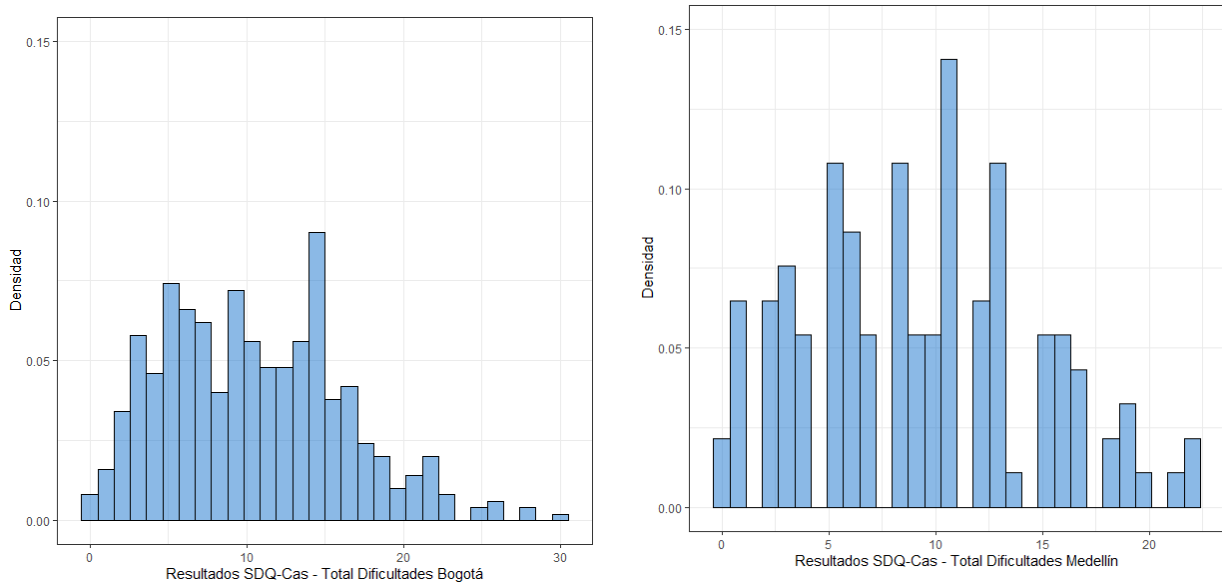
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 5: Mapa ubicación estaciones de medición de contaminación en Medellín**



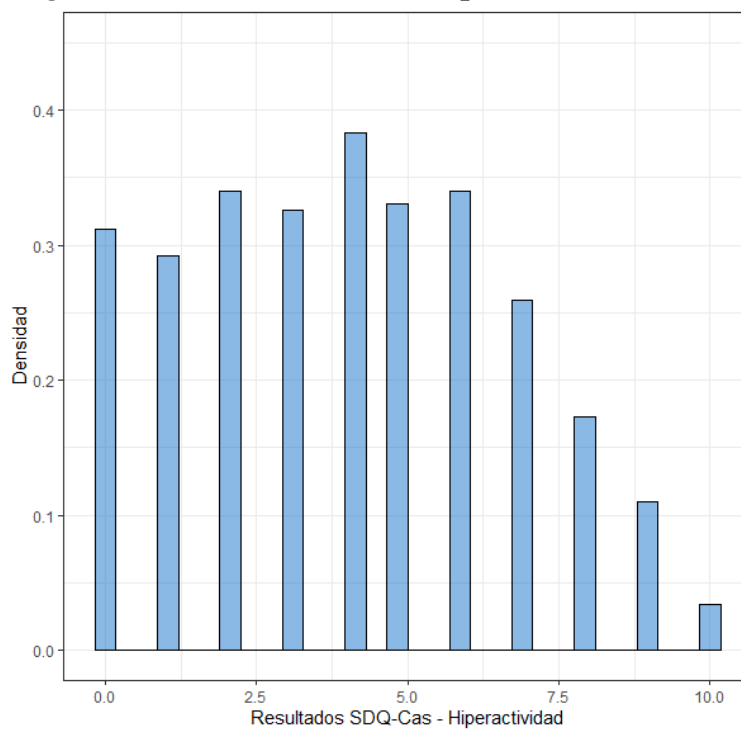
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 6 Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas Bogotá-Medellín**



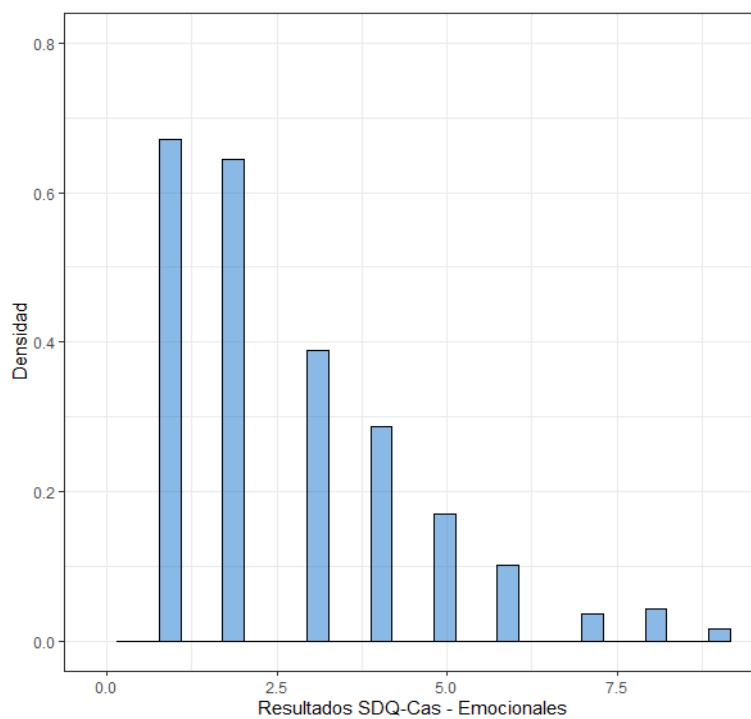
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 7 Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas - Hiperactividad**



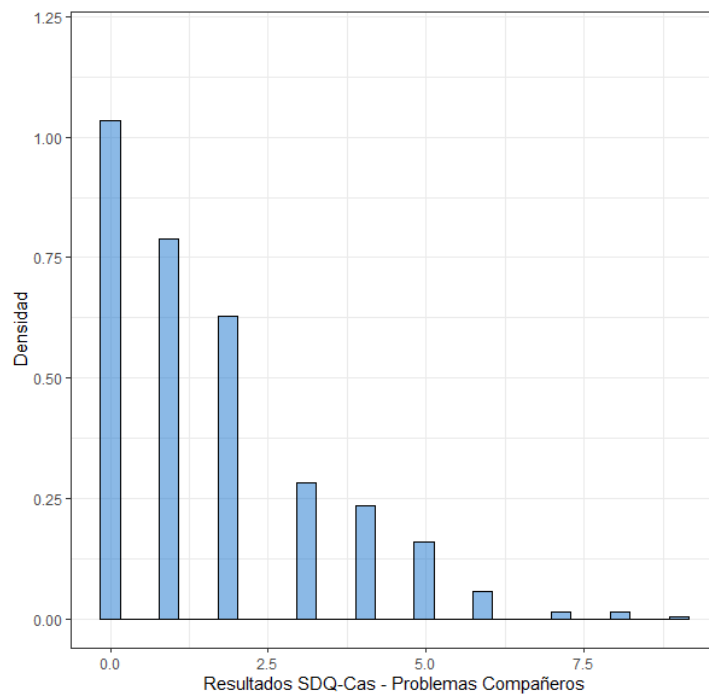
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 8 Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas - Emocionales.**



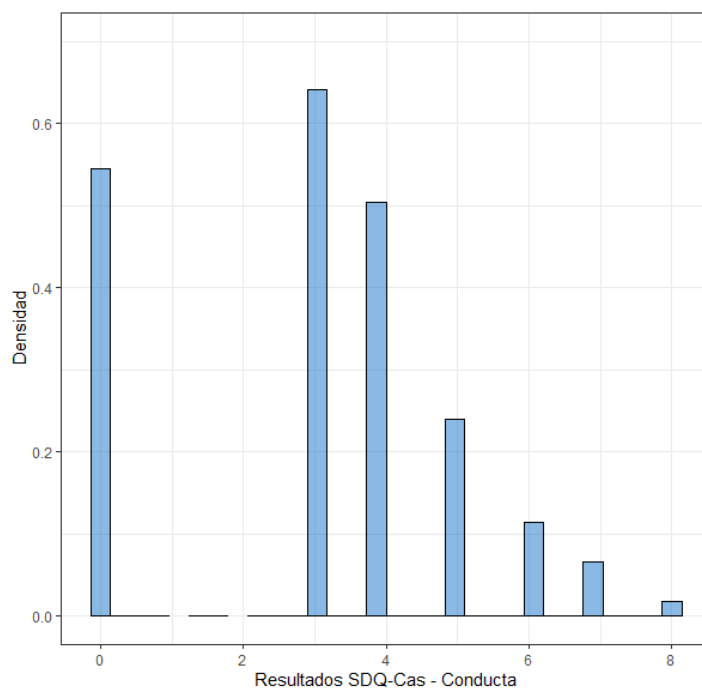
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 9** Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas – Problemas con compañeros.



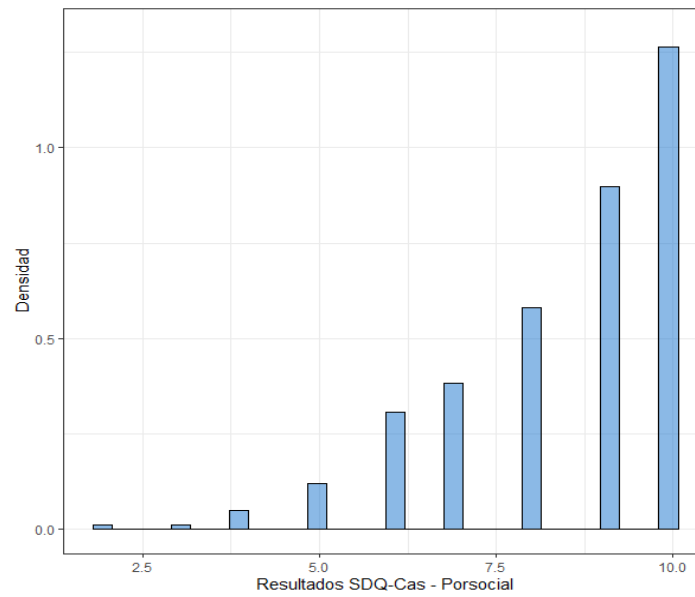
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 10** Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas – Conducta.



Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 11** Histograma de densidad resultados prueba SDQ-Cas – Prosocial.



Fuente: Elaboración propia.