

Impacto de la contaminación del aire y la temperatura máxima en la mortalidad respiratoria en 11 ciudades colombianas (2010-2019)



D. Jimena Roncancio¹, Daniel Sarmiento², Laura Cabezas-Pinzón³, Héctor Adolfo Rueda³, Cristian Andrés Villamil²

1. Grupo Agua, Salud y Ambiente. Facultad de Ingeniería, Universidad El Bosque. Bogotá, D.C.
2. Facultad de ciencias. Universidad El Bosque, Bogotá.
3. Grupo de Investigación Saneamiento Ecológico, Salud y Medio Ambiente. Instituto de Salud y Ambiente. Vicerrectoría de Investigaciones. Universidad El Bosque. Bogotá, D.C.

Antecedentes

- La contaminación del aire y las temperaturas extremas son factores ambientales críticos que aumentan la mortalidad respiratoria y cardiovascular, especialmente en el contexto del cambio climático.
- Este trabajo analiza los efectos combinados de PM2.5, NO₂, SO₂ y temperaturas máximas sobre la mortalidad respiratoria en 11 ciudades colombianas, representativas de diversas condiciones climáticas y urbanas.

Métodos



- Se utilizaron datos diarios (2010-2019) de mortalidad (SISPRO), temperaturas máximas (IDEAM) y concentraciones de PM_{2.5}, NO₂ y SO₂ (ECMWF) en 11 ciudades colombianas.
- La mortalidad se estandarizó en tasas por 100,000 habitantes, y los análisis se centraron en el percentil 90 de contaminantes y temperatura para capturar eventos extremos.
- Se calcularon coeficientes de correlación de Pearson y escalados para evaluar asociaciones lineales y no lineales entre las variables ambientales y la mortalidad.
- Las series temporales se descompusieron en componentes de tendencia, estacionalidad e irregularidad, y se aplicó un análisis de cointegración para identificar relaciones de largo plazo.
- Se utilizó un Distributed Lag Nonlinear Model (DLNM) para capturar efectos no lineales y retardados, ajustando con una función de enlace Quasipoisson para manejar sobredispersión.
- Finalmente, se aplicó un modelo de efectos mixtos generalizado de Poisson, incorporando efectos aleatorios por ciudad y tiempo para capturar heterogeneidad espacial y temporal, validado mediante AIC, BIC y pruebas ANOVA.

Resultados

- Bogotá, Medellín y Cartagena presentaron los valores más altos en el intercepto, lo cual sugiere una mayor carga de mortalidad estimada.
- Se identificaron efectos retardados en la exposición a contaminantes en Bogotá (1-4 días), Valledupar (1-3 días) y Villavicencio (3 días), lo que indica un efecto diferido de la contaminación en la mortalidad.
- NO₂ mostró una asociación positiva significativa con la mortalidad ($\beta = 0.009$, $p = 0.008$), mientras que PM2.5 presentó una asociación negativa ($\beta = -0.002$, $p = 0.0494$), aunque podría estar influenciada por factores de confusión. (Tabla 1)



Interacción sinérgica entre NO₂ y temperatura: más calor, mayor riesgo respiratorio

Nuestros resultados revelaron una interacción estadísticamente significativa entre la temperatura máxima diaria y el dióxido de nitrógeno (NO₂) en su efecto sobre la mortalidad respiratoria ($\beta = -0.004$, $p = 0.0005$). Este hallazgo sugiere que el impacto del NO₂ en la salud se modula en función de la temperatura ambiental, lo cual es consistente con estudios previos (Gasparrini et al., 2015; Vicedo-Cabrera et al., 2021). Esto puede implicar que las estrategias de monitoreo deberían incluir alertas diferenciadas en periodos de calor extremo para evaluar la formación de ozono troposférico.

Tabla 1. Resultados del modelo DLNM					
Municipio	Intercepto	Retrasos significativos	PM2.5	NO2	SO2
Bogotá	2,6471(0.10)*	1,2,3,4	0,001(0,005)**	-0,003(0,001)*	0,0009(0,002)
Medellín	1,98(0,12)****	-	-0,03(0,15)*	-0,009(0,002)***	-0,006(0,04)
Villavicencio	0,9625(0,19)***	3	0,013(0,10)	-0,004(0,003)	0,0143(0,011)
Neiva	0,038(0,15)	-	0,008(0,12)	-0,002(0,033)	0,0001(0,006)
Valledupar	0,277(0,255)	1,2,3	-0,008(0,07)*	-0,001(0,004)	0,0002(0,05)
Tunja	0,038(0,15)	4	0,008(0,12)*	-0,002(0,003)	0,0008(0,006)
Pasto	0,5014(0,1551)**	4	0,004(0,02)*	-0,002(0,003)	-0,004(0,033)
Cúcuta	0,077(0,182)***	-	-0,007(0,009)	-0,011(0,003)**	0,006(0,008)
Palmira	0,755(0,2026)***	4	0,0307(0,024)*	-0,007(0,003)*	0,008(0,007)
Ibagué	0,6569(0,17)***	2,4	-0,014(0,016)	-0,007(0,016)*	0,007(0,022)**
Cartagena	0,88(0,182)***	4	0,026(0,006)***	-0,0174(0,004)***	-0,005(0,004)

Códigos de Significancia Estadística: 0, "****" 0.001 "***" 0.01 "**" 0.05 "*" . " 0.1 " "

Valores en () Referencia a la desviación estándar de la estimación de parámetro

Asociación significativa positiva

Asociación significativa negativa o inversa

Tabla 2. Resultado de análisis de efectos fijos				
	Estimado	Desviación Estándar	Valor Z	Pr(> z)
Temperatura	0.001	0.0027	0.559	0.5489
PM25	-0.002	0.001	-1.965	0.0494*
NO2	0.009	0.003	2.648	0.008**
SO2	-0.001	0.001	-0.806	0.421
Temperatura:PM25	0.007	0.003	2.04	0.0413*
Temperatura:NO2	-0.004	0.001	-3.48	0.0005***

Área de Estudio

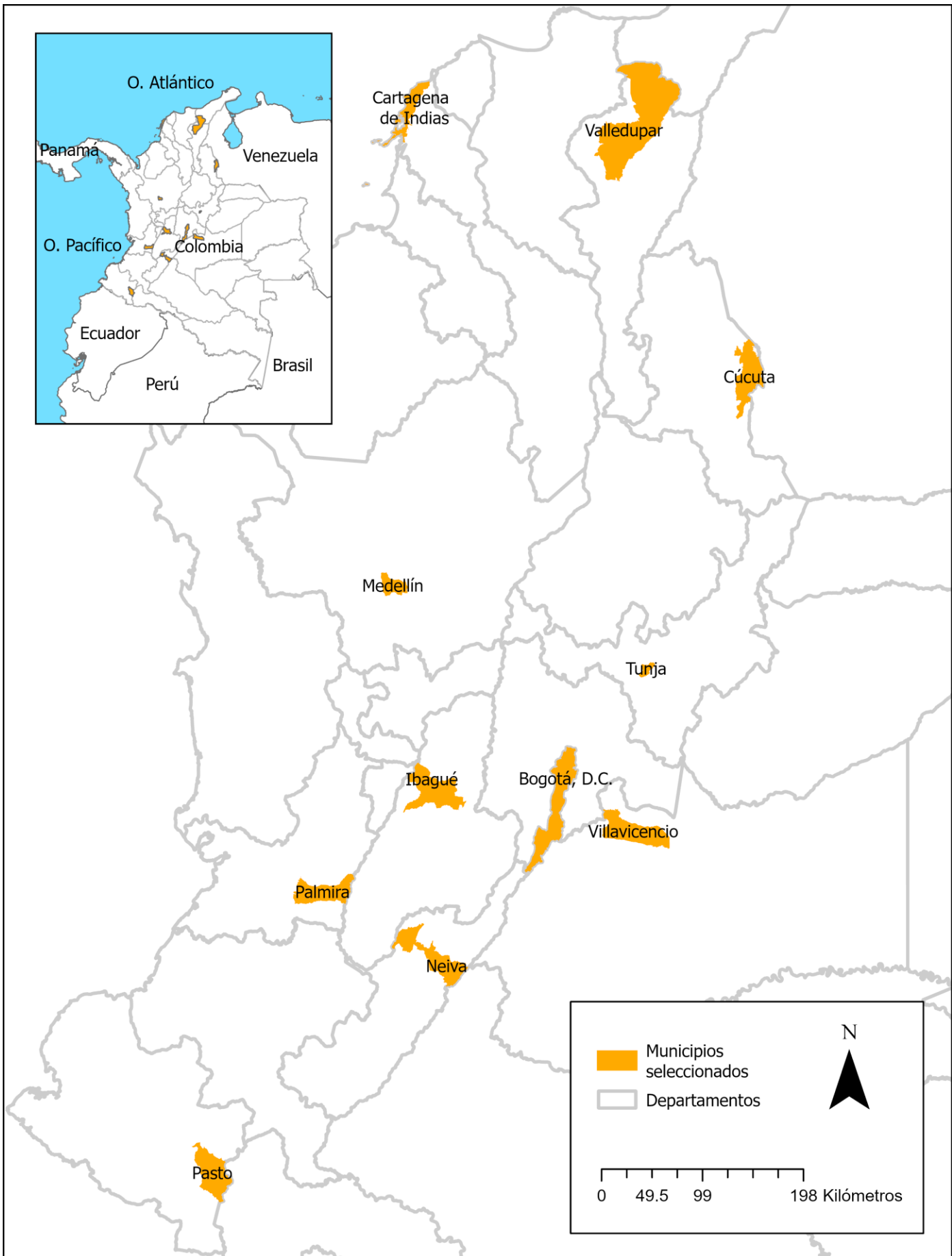


Figura 1. Ubicación de los 11 municipios seleccionados en Colombia

Implicaciones

- Los efectos retardados observados en ciudades de mayor altitud (Bogotá, Tunja e Ibagué) sugieren la necesidad de monitoreo continuo de calidad del aire y estrategias de alerta temprana en estas regiones, donde la acumulación de contaminantes y condiciones atmosféricas particulares aumentan el riesgo para la salud pública (Marodón et al., 2023).
- La relación significativa entre PM2.5 y mortalidad respiratoria en Tunja resalta la importancia de regulaciones más estrictas para el control de material particulado en ciudades de altitud intermedia, donde la hipoxia y la baja presión atmosférica incrementan la vulnerabilidad de la población (Borlaza-Lacoste et al., 2024).
- Las diferencias en el tiempo de respuesta ante la exposición a contaminantes en ciudades como Bogotá, Tunja y Cartagena indican la necesidad de políticas diferenciadas de mitigación y adaptación, considerando no solo la contaminación, sino también variables climáticas locales y características urbanas (Tavella et al., 2025).

Referencias y agradecimientos

Este proyecto es financiado por la Convocatoria Interna de Investigaciones de la Universidad El Bosque 2024 (PCI-2024-0034). Agradecemos el apoyo de la Vicerrectoría de Investigaciones por su respaldo.

