

Exposición materna a monóxido de carbono y su asociación con recién nacidos pequeños para la edad gestacional en una ciudad andina colombiana

Maternal carbon monoxide exposure and its association with small-for-gestational-age newborns in a Colombian Andean city.

Fabian Andres Ruiz Murcia ^{1,2*} , Leidy Diana Henao Navarro ¹ ,
Nelson Enrique Arias Ortiz ¹ 

¹ Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

² Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

Recibido: 24/05/2025. Aprobado: 5/02/2026

Resumen

Introducción: Los recién nacidos pequeños para la edad gestacional (PEG), se definen como peso al nacer por debajo del percentil 10 corresponden a un desenlace perinatal adverso con implicaciones en la salud a corto y largo plazo. La exposición prenatal al monóxido de carbono (CO), derivado del tráfico vehicular, ha sido relacionada con restricción del crecimiento fetal. Este estudio se realizó con el objetivo de determinar la asociación entre la exposición materna a CO y la ocurrencia de PEG en una ciudad andina colombiana. **Metodología:** Se realizó un estudio transversal analítico, se clasificó a los recién nacidos como casos (PEG) y controles (no PEG) pareados por sexo neonatal. La exposición materna se estimó mediante un inventario de emisiones vehiculares de CO (ton/año/celda de 250×250 m). Se aplicaron análisis descriptivos, χ^2 y pruebas t de Student, así como modelos multivariantes de regresión logística incondicional para PEG y regresión lineal robusta para peso al nacer. Se ajustó por edad materna, paridad, régimen de aseguramiento y estado civil. Se consideró significativo $p < 0,05$. **Resultados:** Se incluyeron 71 casos con bajo peso y 142 controles. La exposición promedio a CO fue mayor en los casos (137 vs. 35 toneladas/año/celda de 250mX250m; $p < 0,001$). La exposición por encima del cuarto cuartil de CO se asoció con un mayor riesgo de PEG (OR ajustado: 15.2 IC95%: 7,2–32; $p < 0,001$). Por cada desviación estándar adicional de emisiones, el peso al nacer disminuyó en promedio 186 gramos. **Conclusiones:** La exposición prenatal a CO vehicular se asocia con mayor riesgo de PEG. Este hallazgo respalda la necesidad de políticas públicas orientadas al control de emisiones como medida preventiva en salud materno-perinatal y la necesidad de estudios que incluyan mediciones directas de concentraciones y ventanas gestacionales.

Palabras Clave: Recién Nacido Pequeño para la Edad Gestacional; Monóxido de Carbono; Exposición Materna; Contaminación del Aire

 * Correspondencia: Fabian Andres Ruiz Murcia, fabianandres.ruiz@utp.edu.co, Universidad Tecnológica de Pereira. Cra. 27 #10-02 Barrio Alamos, Pereira, Colombia

Forma de citar: Ruiz-Murcia FA, Henao L, Arias-Ortiz NE. Exposición materna a monóxido de carbono y su asociación con recién nacidos pequeños para la edad gestacional en una ciudad andina colombiana. Salud UIS. 2026; 58: e26v58a15. doi: <https://doi.org/10.18273/saluduis.58.e26v58a15>



Abstract

Introduction: Small-for-gestational-age (SGA) newborns, defined as birth weight below the 10th percentile, represent an adverse perinatal outcome with short- and long-term health implications. Prenatal exposure to carbon monoxide (CO), derived from vehicular traffic, has been associated with fetal growth restriction. This study aimed to determine the association between maternal exposure to CO and the occurrence of SGA in a Colombian Andean city. **Methodology:** An analytical cross-sectional study was conducted. Newborns were classified as cases (SGA) and controls (non-SGA), matched by neonatal sex. Maternal exposure was estimated using an inventory of vehicular CO emissions (tons/year per 250×250 m grid cell). Descriptive analyses, χ^2 and Student's t tests were performed, as well as multivariable unconditional logistic regression models for SGA and robust linear regression for birth weight. Models were adjusted for maternal age, parity, health insurance scheme, and marital status. A p-value <0.05 was considered significant. **Results:** A total of 71 cases and 142 controls were included. Mean exposure to CO was higher among cases than controls (137 vs. 35 tons/year/250×250 m; p<0.001). Exposure above the fourth quartile of CO was associated with an increased risk of SGA (adjusted OR: 15.2; 95% CI: 7.2–32; p<0.001). For each additional standard deviation of emissions, birth weight decreased by an average of 186 grams. **Conclusions:** Prenatal exposure to vehicular CO is associated with an increased risk of SGA. This finding supports the need for public policies aimed at emission control as a preventive measure for maternal and perinatal health, and underscores the importance of studies including direct measurements of pollutant concentrations and gestational exposure windows.

Keywords: Infant, Small for Gestational Age; Carbon Monoxide; Maternal Exposure; Air Pollution.

Introducción

El adecuado desenlace de los embarazos constituye un indicador directo del funcionamiento eficiente de los sistemas de salud y del desarrollo social de una población; por ello, los diversos factores que conducen a desenlaces obstétricos adversos son objeto constante de investigación científica ¹.

El bajo peso al nacer (BPN) y el denominado recién nacido pequeño para la edad gestacional (PEG) representan un problema importante de salud pública debido a su asociación con complicaciones a lo largo de la vida, como mayor morbilidad y mortalidad neonatal, estancias hospitalarias prolongadas, ingreso a unidades de cuidado intensivo, secuelas discapacitantes y mayor riesgo de enfermedades crónicas en la adultez ¹⁻⁵. Dada su repercusión sobre la salud humana, se han desarrollado múltiples estrategias para reducir su incidencia, entre ellas la iniciativa “Metas Globales para 2025” de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que propone una reducción del 30 % en la tasa de BPN para dicho año ⁶.

La OMS define con BPN a todo recién nacido con un peso inferior a 2.500 gramos², no obstante, otras definiciones incorporan la relación entre el peso y la edad gestacional, utilizando curvas de crecimiento poblacionales y distribuciones percentilares ⁷⁻⁹. Se considera PEG a aquel neonato cuyo peso se encuentra por debajo del percentil 10 para su edad gestacional, umbral que se emplea como criterio para valorar el riesgo de eventos adversos y mortalidad perinatal ^{2,9-12}.

Se estima que entre el 5 % y el 20 % de los nacidos vivos son PEG ²; en Colombia, diversos estudios han reportado prevalencias de PEG en diferentes instituciones y regiones; sin embargo, los datos oficiales adoptan la definición de la OMS. Por ejemplo, el Ministerio de Protección Social reportó una prevalencia nacional del 9 % para el año 2014, mientras que en Manizales se estimó en 8,28 % ^{13,14}.

En las últimas décadas, el estudio de la relación entre exposición a contaminación ambiental y aparición de diversas patologías ha cobrado gran relevancia ^{15,16}. Numerosos estudios han evidenciado la asociación entre la exposición prenatal a compuestos químicos presentes en emisiones atmosféricas y su interacción con desenlaces obstétricos adversos, tales como malformaciones congénitas, parto pretérmino, mortalidad perinatal, talla baja, alteraciones del desarrollo psicomotor infantil y restricción del crecimiento fetal ¹⁷⁻²².

Una de las principales fuentes de emisión de compuestos perjudiciales para la salud es el tráfico vehicular, que libera material particulado, óxidos de nitrógeno, metales pesados, compuestos halogenados y aromáticos, ozono y monóxido de carbono (CO), entre otros, todos con evidencia de asociación con PEG ²³⁻²⁵. Entre estos, el CO

ha sido ampliamente estudiado por su relación con desenlaces obstétricos adversos; este se trata de un producto de combustión de compuestos orgánicos e inorgánicos, siendo los vehículos automotores una de las principales fuentes emisoras. Como respuesta, se han emitido recomendaciones sanitarias para establecer límites máximos de emisión, con el fin de minimizar los efectos ambientales y sanitarios sobre la población expuesta, junto con medidas para mitigar el impacto del tráfico vehicular ¹⁵⁻²¹.

La mayoría de estudios epidemiológicos estiman la exposición mediante concentraciones ambientales, medidas o modeladas (p.ej., $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En nuestro estudio utilizamos un modelo espacial de emisiones vehiculares (ton/año/celda) como aproximado de exposición residencial, aunque están relacionadas, no son equivalentes; por tanto, la comparación directa de magnitudes de efecto con literatura basada en concentraciones debe interpretarse con cautela.

En 2018, Gómez et al. realizaron un estudio en la ciudad colombiana de Manizales, que estimó las emisiones temporales y espaciales de material particulado menor de 10 micras (PM_{10}) y CO proveniente del tráfico vehicular, utilizando una cuadrícula de 250 x 250 metros para identificar zonas con mayor concentración de contaminantes ^{25,26}; estos datos permitieron definir la exposición a CO en la ciudad y analizar su asociación con la ocurrencia de PEG. Existen estudios regionales que relacionan contaminación del aire y desenlaces perinatales, nuestro trabajo aporta evidencia con un enfoque geoespacial de emisiones vehiculares, complementando estudios previos con concentraciones ambientales.

Metodología

Diseño del estudio

Se realizó un estudio transversal analítico con revisión retrospectiva de historias clínicas de nacimientos atendidos en una institución de tercer nivel en Manizales (Colombia) entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2014.

El tamaño de muestra se determinó considerando estudios previos que compararon la exposición a diferentes concentraciones de material particulado, en los cuales se encontró una probabilidad de exposición a concentraciones elevadas del 10% en el grupo control (p_1) y del 26% en el grupo de casos (p_2) ²⁷. Para este estudio, se utilizó una razón de probabilidades (OR) esperada de 1,5 (w). Se estableció un nivel de confianza del 95% (α) y un poder estadístico ($1-\beta$) del 80%. Se adoptó una razón de controles (m) a casos (n) de 2:1. Los cálculos determinaron un tamaño de muestra de 69 casos y 139 controles.

Criterios de inclusión

- Mujeres que recibieron atención del parto o cesárea entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2014.
- Madres de recién nacidos con peso al nacer por debajo del percentil 10 para la edad gestacional, calculado mediante la herramienta INTERGROWTH-21.
- Residentes en la zona urbana de la ciudad, con direcciones georreferenciadas.

Criterios de exclusión

- Historias clínicas incompletas.
- Antecedentes de enfermedad tiroidea, diabetes pregestacional o gestacional, trastornos hipertensivos del embarazo, hipertensión crónica, consumo de sustancias psicoactivas, enfermedades autoinmunes u oncológicas, desnutrición materna, malformaciones congénitas, incompatibilidad Rh o embarazos múltiples.

Determinación de la exposición

Se utilizaron los datos de estimaciones de desagregación espacial y temporal de las concentraciones de PM_{10} y monóxido de carbono (CO) correspondientes al año 2014, descritos por Gómez et al. ²⁶. Se creó una capa geográfica cuadriculada con resolución de 250 x 250 metros mediante el software ArcGIS® para la zona urbana de Manizales, lo cual permitió visualizar la distribución espacial de las concentraciones de PM_{10} y CO por celda.

Las residencias de los sujetos se ubicaron geográficamente en otra capa mediante ArcGIS® y se superpusieron para su visualización en la plataforma Google My Maps®. La emisión de exposición se consideró como el valor estimado correspondiente a la celda donde se ubicaba cada caso y control.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con el software Stata IC 14.2. La normalidad de las variables continuas se evaluó mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Las variables con $p > 0,05$ se resumieron con media y desviación estándar; aquellas con $p < 0,05$ se reportaron como mediana y rango intercuartílico. Para la comparación bivariada en este estudio transversal analítico se utilizaron pruebas χ^2 para variables categóricas y t de Student o Mann-Whitney según la distribución de las continuas.

Se estimaron odds ratios (OR) crudos con sus intervalos de confianza del 95%. Posteriormente, se aplicaron modelos de regresión logística multivariable incondicional para evaluar la asociación entre emisiones de CO (exposición) y PEG (desenlace), ajustando por edad materna, paridad, estado civil y régimen de aseguramiento. Como análisis complementario, el peso al nacer se modeló como variable continua mediante regresión lineal con errores robustos (Huber). En los modelos para PEG no se incluyó la edad gestacional, ya que forma parte de la definición del desenlace. Se consideró $p < 0,05$ como estadísticamente significativo.

Resultados

Se incluyó un total de 213 pacientes, distribuidos en 71 casos y 142 controles. La edad promedio de las participantes fue de 25 años, sin encontrarse diferencias estadísticamente significativas entre casos y controles en cuanto a características socioeconómicas (estado civil, régimen de aseguramiento en salud) ni factores clínicos (número de embarazos previos, antecedentes de abortos). En ambos grupos, el régimen contributivo del sistema de seguridad social en salud fue el más frecuente, con un 60% en los casos y un 64% en los controles; 4 pacientes en cada grupo estaban afiliadas a un régimen especial (fuerzas militares o magisterio) (Tabla 1).

Tabla 1. Características maternas y neonatales.

Característica	Total (n=213)	Casos (n=71)	Controles (n=142)	Valor p
Maternas				
Edad materna (años)				0,801
Promedio	25,80 $\pm$ 5,50	25,60 $\pm$ 4	26 $\pm$ 2,40	
Estado civil				0,222
Soltera	48,82 (104)	50,7 (36)	47,88 (68)	
Casada	18,77 (40)	19,71 (14)	18,3 (26)	
Unión libre	30,98 (66)	29,57 (21)	31,69 (45)	
Separada	0,46 (1)	0	0,7 (1)	
Viuda	0,93 (2)	0	1,4 (2)	
Régimen de aseguramiento				0,270
Contributivo	62,91 (134)	60,56 (43)	64,08 (91)	
Subsidiado	30,98 (66)	33,8 (24)	29,57 (42)	
Especial	3,75 (8)	5,63 (4)	2,81 (4)	
No asegurada	2,34 (5)	0	3,52 (5)	
Embarazos previos				0,299
0	64,78 (138)	69,01 (49)	62,67 (89)	
1	24,41 (52)	23,94 (17)	24,64 (35)	

2 o más	10,78 (23)	7,04 (5)	12,67 (18)	
Abortos previos				0,829
Sí	10,79 (23)	11,26 (8)	10,56 (15)	
No	89,2 (190)	88,73 (63)	89,43 (127)	
Neonatal				
Sexo				0,700
Masculino	33,80 (72)	33,80 (24)	33,80 (48)	
Femenino	66,19 (141)	66,19 (47)	66,19 (94)	
Peso al nacer (gramos)				<0,001
Promedio $\pm$ DE	2970 $\pm$ 474	2534 $\pm$ 473	3187 $\pm$ 470	
Mediana	3000	2600	3182	
Rango intercuartílico	2685–3325	2450–2705	3000–3407	
Tipo de parto				0,1
Vaginal	57,3 (122)	50,7 (36)	60,6 (86)	
Cesárea	40,8 (87)	46,5 (33)	38 (54)	
Instrumentado	1,9 (4)	2,8 (2)	1,4 (2)	
Edad gestacional al nacimiento				
30–34 semanas	1,9 (4)	1,4 (1)	2,1 (3)	
35–37 semanas	5,1 (11)	7 (5)	4,2 (6)	
$\geq$	93 (198)	91,6 (65)	93,7 (133)	

P valor calculado con χ^2 o t de Student/Mann-Whitney según tipo de variable.

Las emisiones de monóxido de carbono (CO) presentaron una distribución normal (prueba de Kolmogorov-Smirnov, $p = 0.61$). La exposición promedio a CO en los casos fue de 137 toneladas/año/celda de 250×250 m, con una mediana de 108 (rango intercuartílico: 73 a 195). En contraste, los controles tuvieron una exposición promedio de 35 toneladas/año/celda de 250×250 m, con una mediana de 25,31 (rango intercuartílico: 7,5 a 43). La prueba t de Student mostró una exposición significativamente mayor a emisiones vehiculares de CO en los casos (media: 136,84) en comparación con los controles (media: 36,97) ($t(82,1) = 9.56$, $p < 0.05$). (Tabla 2).

Tabla 2. Emisiones vehiculares de CO en casos y controles.

Grupo	Media $\pm$ DE	Mediana (RIQ)	Valor p
Casos PEG (n=71)	136,8 $\pm$ 90,4	108 (73–195)	
Controles (n=142)	36,92 $\pm$ 26,3	25,3 (7,5–43)	
Total (n=213)	—	—	<0,001

CO: Monóxido de carbono

Emisiones vehiculares de CO expresadas en toneladas/año por celda de 250×250 m. Valor p de la prueba t de Student para la comparación entre casos y controles. Se presenta el intervalo de confianza del 95% (IC). PEG = pequeño para la edad gestacional (<p10 INTERGROWTH-21).

El análisis bivariado evidenció una asociación estadísticamente significativa entre la exposición a niveles de CO por encima del cuarto cuartil, lo que incrementó el riesgo de presentar PEG más de 15 veces (OR crudo: 15,2; IC 95%: 7,2–32; $p < 0,0001$). No se encontró asociación significativa entre otras variables sociodemográficas o clínicas y PEG (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis bivariado (OR crudos) para PEG

Variable	OR crudo (IC95%)	p
Emisiones CO		
Q1–Q3 (73 - 195)	1	
Q4 (mayor a 195)	15,2 (7,2–32)	<0,001
Edad materna $\geq$	—	0,2
Estado civil		
Soltera	1	
Unión libre	0,88 (0,46–1,70)	0,23
Estado civil		
Soltera	1	
Casada	1,02 (0,47–2,19)	0,11
Régimen de aseguramiento		
Contributivo	1	
Subsidiado	1,21 (0,65–2,25)	0,21
Régimen de aseguramiento		
Contributivo	1	
Especial	2,12 (0,51–8,87)	0,33
Paridad		
0	1	
1	0,88 (0,45–1,73)	0,32
Paridad $\geq$	0,50 (0,18–1,44)	0,11
Abortos previos		
No	1	
Sí	1,08 (0,43–2,67)	0,2

Emisiones vehiculares de CO expresadas en toneladas/año por celda de 250×250 m. OR crudos con IC95%. PEG = pequeño para la edad gestacional (<p10 INTERGROWTH-21).

En los modelos multivariantes, las emisiones vehiculares de CO mantuvieron una asociación significativa con PEG, determinando que por cada aumento de una desviación estándar (74,9 toneladas/año/celda de 250×250 m) en la emisión de CO en las emisiones vehiculares de CO en la zona de residencia materna, el peso al nacer disminuye en promedio 186 gramos, según la regresión lineal con errores robustos.

Discusión

La exposición prenatal al monóxido de carbono (CO) se ha vinculado con múltiples patologías tanto en etapas perinatales como en la adultez. Existe evidencia que respalda su asociación con un mayor riesgo de desarrollo de enfermedades como cáncer, diabetes, patologías pulmonares, enfermedades cardiovasculares, déficit cognitivos y trastornos mentales en la vida adulta^{15–18}, de manera similar, se ha relacionado con complicaciones del embarazo, incluyendo parto pretérmino, malformaciones congénitas, trastornos hipertensivos y bajo peso al nacer^{25–32}.

Este efecto puede estar mediado por la disminución de la capacidad de la hemoglobina materna para transportar oxígeno, lo que reduce el suministro de oxígeno al feto. Además, el CO atraviesa la barrera placentaria y afecta directamente a la hemoglobina fetal, generando hipoxia y reduciendo el potencial de crecimiento fetal^{28–31}. Se ha postulado también que puede impactar el tono del músculo liso, la regulación del sistema inmune, y contribuir al estrés oxidativo y daño celular^{30, 33, 34}.

La magnitud de la asociación observada en nuestro estudio fue mayor que la reportada en la literatura internacional, posiblemente explicada por la alta dispersión de las emisiones y la heterogeneidad espacial en la ciudad. Por ejemplo, Qian et al. demostraron que por cada aumento de 100 microgramos por centímetro cúbico en la exposición materna a CO en Wuhan (China), el riesgo de PEG aumentaba un 15% (OR: 1,15; IC 95%: 1,1–1,2) ³⁵. Guo et al. encontraron un aumento del riesgo, especialmente durante el segundo y tercer trimestre del embarazo (OR: 1,04; IC 95%: 1,02–1,05) ³⁶. En América Latina, un estudio realizado en la Amazonía brasileña reportó un aumento del 49% en el riesgo de bajo peso al nacer asociado a exposiciones a CO por encima del cuarto cuartil, usando la definición de la OMS (<2500 g) ³⁷. No obstante, algunos estudios nacionales contradicen estos hallazgos: González et al. no encontraron asociación entre exposición a PM₁₀ y CO con parto pretérmino, y Narváez et al. no reportaron relación con preeclampsia ^{38, 39}.

Manizales, ubicada en la cordillera de los Andes a una altitud promedio de 2.150 metros sobre el nivel del mar, cuenta con una población cercana a los 400.000 habitantes, con alta densidad poblacional (6.800 habitantes por 17 km²) y motorización (455 vehículos por cada 1.000 habitantes en 2018), superando incluso a ciudades más grandes, incluida la capital del país. Estas condiciones favorecen una mayor exposición de la población a compuestos potencialmente nocivos ^{40–44}. El interés por la calidad del aire en Manizales surgió tras la erupción del volcán Nevado del Ruiz el 13 de noviembre de 1986, desastre natural que provocó la muerte de más de 25.000 personas, constituyéndose en una de las tragedias más graves de la historia reciente ⁴⁵. Desde entonces, se han establecido estaciones de monitoreo de calidad del aire, modelos de estimación de concentraciones atmosféricas, y grupos de investigación activos en la materia ^{45, 46}.

Un posible factor de confusión es la altitud de Manizales, sin embargo se encuentra en la región andina, su elevación de 2150 metros sobre el nivel del mar, está por debajo del umbral de 2.500 metros considerado un factor de riesgo para PEG debido a la hipoxia hipobárica ⁴⁷, por tanto, se considera que la asociación encontrada no está necesariamente relacionada con la altitud de la ciudad.

Al evaluar el impacto de la exposición a contaminantes ambientales en la salud gestacional, deben considerarse múltiples variables relacionadas que complejizan el análisis de la causalidad, por ejemplo, la temperatura ambiental también afecta la calidad del aire y los desenlaces clínicos. Ha et al. demostraron un aumento del riesgo relativo de hasta 2,49 (IC 95%: 2,3–2,83) cuando la exposición ocurre durante periodos de calor a lo largo del embarazo ⁴⁷.

Una limitación de este estudio es la imposibilidad de diferenciar con precisión la fuente del CO si es de origen vehicular, industrial o producto de emisiones volcánicas del Nevado del Ruiz. Adicionalmente, resulta difícil aislar los efectos de un solo contaminante, ya que la exposición es a una mezcla de compuestos atmosféricos como óxidos de nitrógeno, azufres, halogenados, y material particulado, entre otros ⁴⁸. La exposición fue estimada con base en la residencia materna, aunque es posible que existan variaciones individuales por movilidad diaria. Sin embargo, el estudio de Choe no encontró diferencias significativas en la exposición a PM_{2.5} y PM₁₀ entre mujeres que trabajaban fuera del hogar y la ocurrencia de PEG ^{49,50}, lo que respalda la validez del uso de la residencia como punto primario de exposición en nuestro análisis.

La duración de la exposición y sus variaciones a lo largo de los trimestres gestacionales son factores críticos para establecer asociaciones. Dado que en este estudio la estimación de emisiones se realizó para el año calendario 2014, no fue posible determinar con precisión las variaciones para pacientes con inicio de gestación en 2013. No obstante, se asumió que el patrón de emisiones se mantiene estable entre años consecutivos. Estas limitaciones metodológicas introducen factores de confusión que deben considerarse en la interpretación de los resultados. Aun así, estudios como los de Lu Jia ⁵¹ y Hooven ⁵² respaldan el uso de promedios mensuales o anuales estimados, ya que estos facilitan el análisis de asociaciones epidemiológicas.

Aunque inicialmente se consideró un diseño pareado, el análisis se realizó bajo un enfoque transversal analítico con modelos no condicionados. Esta decisión se fundamenta en el riesgo de sobre-pareamiento (overmatching) descrito por Pearce ⁵³, dado que el lugar de residencia es un fuerte determinante de la exposición a emisiones de CO. Al emplear una regresión logística convencional ajustada, se evitó la pérdida de potencia estadística y se permitió una estimación más robusta de los Odds Ratio (OR), en línea con las recomendaciones de Rose y Van Der Laan ⁵⁴ sobre la eficiencia en el diseño de estudios con variables de confusión geográficas

La exposición a emisiones vehiculares de CO se estimó utilizando los datos publicados por Gómez ²⁵, quien modeló las emisiones con base en el conteo de vehículos, estimaciones por tipo vehicular y proximidad a vías principales y secundarias, usando modelos de dispersión y movimiento de masas atmosféricas para generar una celda de 250 x 250 metros. Esta medición indirecta puede introducir imprecisión en la estimación de emisiones, por lo que se sugiere realizar estudios futuros con mediciones directas.

En este estudio, las emisiones se reportan en toneladas por año por celda de 250 x 250 metros, mientras que otros estudios reportan concentraciones en unidades de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ^{13–20, 26, 28, 32–34, 44–47}, es fundamental diferenciar que las primeras representan la producción y distribución del contaminante sobre el terreno, mientras que las segundas expresan su dilución y transporte en la atmósfera. Este estudio se enfocó en una fuente específica (fuentes móviles) y su efecto directo ^{40–42, 47}; investigaciones futuras deberían incorporar ambas metodologías para explorar diferencias e impactos clínicos. Asimismo, resulta crucial estudiar el efecto de emisiones industriales sobre el PEG, dado que su composición química difiere de las emisiones vehiculares y su toxicidad perinatal ha sido demostrada ^{13, 15, 20}. A pesar de la antigüedad de los datos, los patrones de tránsito, la topografía urbana y las condiciones meteorológicas de Manizales han permanecido relativamente constantes en la última década, lo que sustenta la validez de los hallazgos.

El análisis estadístico reveló una alta dispersión en los valores de emisiones vehiculares de CO, con diferencias superiores a 100 veces entre los valores mínimos y máximos, lo que podría explicar OR más elevados que los reportados en estudios previos, se infiere una posible desigualdad en la distribución espacial entre casos y controles, con presencia de conglomerados de contaminación que deben ser identificados en estudios futuros. En cuanto a la distribución espacial en la ciudad de Manizales, se infiere que los casos se concentran en zonas de alto tráfico vehicular, con condiciones sanitarias subóptimas, pobreza y exposición a contaminantes industriales y residuos, aspectos que no pudieron ser evaluados mediante esta metodología. Esta combinación de factores, sumada a otros no incluidos en el modelo, podría haber actuado de manera sinérgica, revelando un riesgo elevado ¹².

El impacto de las emisiones vehiculares sobre el peso al nacer representa un vacío de conocimiento en la región. Este estudio constituye uno de los primeros en Latinoamérica en explorar la asociación entre emisiones vehiculares y PEG, aportando evidencia novedosa desde un contexto urbano andino y complementando hallazgos previos que han empleado concentraciones atmosféricas como métrica de exposición.

Conclusiones

La exposición prenatal a emisiones vehiculares de monóxido de carbono se asocia con una mayor probabilidad de presentar recién nacidos PEG, independientemente de factores maternos como la edad, la paridad, el estado civil y el régimen de aseguramiento en salud. Estos hallazgos son consistentes con la literatura internacional y aportan evidencia adicional desde un contexto urbano andino en Latinoamérica.

Se recomienda la realización de estudios adicionales que incorporen mediciones directas de concentraciones atmosféricas, co-contaminantes y análisis estratificados por trimestre gestacional, con el fin de precisar la magnitud y los periodos críticos de exposición. Nuestros resultados sugieren que las emisiones vehiculares, como factor potencialmente modificable, deben considerarse en el diseño de políticas gubernamentales y de salud pública orientadas a reducir la incidencia de desenlaces obstétricos adversos como el PEG.

Contribución de autores

FA, NE diseñaron y desarrollaron el estudio, realizaron informe y manuscrito. LD realizó asesoría temática. NE, LD asesoraron el análisis estadístico y metodológico. Todos los autores leyeron, editaron y aprobaron el manuscrito

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad de Caldas y al SES Hospital Universitario de Caldas por su apoyo para la realización de esta investigación. Este manuscrito está dedicado a la memoria de la Dra. Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga (Q.E.P.D.), cuyas contribuciones a la investigación y la educación en la región merecen ser recordadas y celebradas.

Consideraciones éticas

Esta investigación se adhiere a los principios éticos establecidos por las normativas nacionales e internacionales que regulan los estudios con sujetos humanos, conforme a la legislación colombiana vigente. El presente manuscrito corresponde a los resultados del trabajo de grado para obtener el título de especialista en ginecología y obstetricia del investigador principal. El protocolo fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad de Caldas. Se garantiza la confidencialidad de la información suministrada, conforme a los parámetros legales de respeto y privacidad.

Conflicto de interés.

Los autores declaran no presentar conflictos de interés.

Financiación.

Este estudio no recibió ningún tipo de financiación.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Durante la preparación del presente trabajo, los autores no utilizaron inteligencia artificial durante su desarrollo. Los autores revisaron y editaron el contenido conforme a los estándares académicos y asumen completa responsabilidad por el contenido final del manuscrito.

Referencias

1. World Health Organization. 2018 Global reference list of 100 core health indicators (plus health-related SDGs). Geneva: WHO; 2018. [Internet] [Accessed 8 April 2025] Available from: [https://www.who.int/publications/item/2018-global-reference-list-of-100-core-health-indicators-\(-plus-health-related-sdgs\)](https://www.who.int/publications/item/2018-global-reference-list-of-100-core-health-indicators-(-plus-health-related-sdgs))
2. World Health Organization. WHO recommendations for care of the preterm or low-birth-weight infant. Geneva: WHO; 2022. [Internet] [Accessed 8 April 2025] Available from: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/363697/9789240058262-eng.pdf>
3. Grillo MA, Mariani G, Ferraris JR. Prematurity and Low Birth Weight in Neonates as a Risk Factor for Obesity, Hypertension, and Chronic Kidney Disease in Pediatric and Adult Age. *Front Med (Lausanne)*. 2022; 8: 769734. doi: <https://doi.org/10.3389/fmed.2021.769734>
4. de Mendonça ELSS, de Lima Macêna M, Bueno NB, de Oliveira ACM, & Mello CS. Premature birth, low birth weight, small for gestational age and chronic non-communicable diseases in adult life: A systematic review with meta-analysis. *Early Hum Dev*. 2020; 149: 105154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2020.105154>
5. Eves R, Mendonça M, Baumann N, Ni Y, Darlow BA, Horwood J, et al. Association of Very Preterm Birth or Very Low Birth Weight With Intelligence in Adulthood: An Individual Participant Data Meta-analysis. *JAMA Pediatr*. 2021; 175 (8): e211058. doi: <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2021.1058>
6. World Health Organization. Global nutrition targets 2025: low birth weight policy brief. Geneva: WHO; 2014. [Internet] [Accessed 7 April 2025] Available from: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/149020/WHO_NMH_NHD_14.5_eng.pdf
7. Damhuis SE, Ganzevoort W, Gordijn SJ. Abnormal Fetal Growth: Small for Gestational Age, Fetal Growth Restriction, Large for Gestational Age: Definitions and Epidemiology. *Obstet Gynecol Clin North Am*. 2021; 48 (2): 267-279. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ogc.2021.02.002>

8. Papageorgiou AT, Kennedy SH, Salomon LJ, Altman DG, Ohuma EO, Stones W, et al. The INTERGROWTH-21st fetal growth standards: toward the global integration of pregnancy and pediatric care. *Am J Obstet Gynecol.* 2018; 218 (2) :S630-S640. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2018.01.011>
9. Figueras F, Gratacós E. An integrated approach to fetal growth restriction. *Best Pract Res Clin Obstet Gynaecol.* 2017; 38: 48-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2016.10.006>
10. Unterscheider J, Daly S, Geary MP, Kennelly MM, McAuliffe FM, O'Donoghue K, et al. Optimizing the definition of intrauterine growth restriction: The multicenter prospective PORTO study. *Obstet Gynecol Surv.* 2013; 68 (8): 549-551. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2013.02.007>
11. Kiserud T, Benachi A, Hecher K, Perez RG, Carvalho J, Piaggio G, et al. The World Health Organization fetal growth charts: concept, findings, interpretation, and application. *Am J Obstet Gynecol.* 2018; 218 (2S): S619-S629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2017.12.010>
12. Risnes KR, Vatten LJ, Baker JL, Jameson K, Sovio U, Kajantie E, et al. Birthweight and mortality in adulthood: a systematic review and meta-analysis. *Int J Epidemiol.* 2011; 40 (3): 647-661. doi: <https://doi.org/10.1093/ije/dyq267>
13. Ministerio de Salud y Protección Social. Análisis de Situación de Salud (ASIS). Dirección de Epidemiología y Demografía. Bogotá: Ministerio de Salud y Protección Social; 2018. [Internet] [Accessed 8 April 2025] Available from: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/PSP/asis-nacional-2017.pdf>
14. Castelblanco Niño ML, Cerquera Guerrero L, Vélez Álvarez C, Vidarte Claros JA. Caracterización de los determinantes sociales de la salud y los componentes de la discapacidad en la ciudad de Manizales, Colombia. *Diversitas.* 2014; 10 (1): 87-102. doi: <https://doi.org/10.15332/s1794-9998.2014.0001.06>
15. Chandia-Poblete D, Cole-Hunter T, Haswell M, Heesch, KC. The influence of air pollution exposure on the short- and long-term health benefits associated with active mobility: A systematic review. *Sci Total Environ.* 2022; 850: 157978. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157978>
16. Lipfert FW. Long-term associations of morbidity with air pollution: A catalog and synthesis. *J Air Waste Manag Assoc.* 2018; 68 (1): 12-28. doi: <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1349010>
17. Brunekreef, B, Strak M, Chen J, Andersen ZJ, Atkinson R, Bauwelinck M, et al. Mortality and morbidity effects of long-term exposure to low-level PM_{2.5}, BC, NO₂, and O₃: an analysis of European cohorts in the ELAPSE Project. *Res Rep Health Eff Inst.* 2021; (208): 1-127. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9476567/>
18. Park J, Kim WJ, Kim J, Jeong CY, Park H, Hong YC, et al. Prenatal Exposure to Traffic-Related Air Pollution and the DNA Methylation in Cord Blood Cells: MOCEH Study. *Int J Environ Res Public Health.* 2022; 19 (6) :3292. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph19063292>
19. Bearblock E, Aiken CE, Burton GJ. Air pollution and pre-eclampsia; associations and potential mechanisms. *Placenta.* 2021; 104: 188-194. doi: <https://doi.org/10.1016/j.placenta.2020.12.009>
20. Morris RH, Counsell SJ, McGonnell IM, Thornton C. Early life exposure to air pollution impacts neuronal and glial cell function leading to impaired neurodevelopment. *Bioessays.* 2021; 43 (9): e2000288. doi: <https://doi.org/10.1002/bies.202000288>
21. Zhang H, Zhang X, Wang Q, Xu Y, Feng Y, Yu Z, et al. Ambient air pollution and stillbirth: An updated systematic review and meta-analysis of epidemiological studies. *Environ Pollut.* 2021; 278: 116752. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116752>

22. Fussell JC, Jauniaux E, Smith RB, Burton GJ. Ambient air pollution and adverse birth outcomes: A review of underlying mechanisms. *BJOG*. 2024; 131 (5): 538-550. doi:<https://doi.org/10.1111/1471-0528.17727>
23. World Health Organization. Air Pollution. Geneva: WHO; 2023. [Internet] [Accessed 11 April 2025] Available from: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_2
24. Chen Y, Hodgson S, Gulliver J, Granell R, Henderson AJ, Cai Y, et al. Trimester effects of source-specific PM10 on birth weight outcomes in the Avon Longitudinal Study of Parents and Children (ALSPAC). *Environ Health*. 2021; 20 (1): 4. doi: <https://doi.org/10.1186/s12940-020-00684-w>
25. Cuadrado-Grisales LT, Ruiz-Murcia FA, Henao-Navarro LD, Aristizabal-Zuluaga BH. Birth Defects and Prenatal Exposure to Particulate Matter in a Colombian Population. *Rev Peru Ginecol Obstet*. 2023; 69 (3): 1-7. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2304-51322023000300005&script=sci_arttext&lng=en
26. Gómez CD, González CM, Osses M, Aristizabal BH. Spatial and Temporal Disaggregation of the On-road Vehicle Emission Inventory in a Medium-sized Andean City: Comparison of GIS-based Top-down Methodologies. *Atmos Environ*. 2018; 179: 142-155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.049>
27. Wang X, Ding H, Ryan L, Xu X. Association between air pollution and low birth weight: a community-based study. *Environ Health Perspect*. 1997; 105 (5): 514-520. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1469882/>
28. Dickson MA, Peterson N, McRae KE, Pudwell J, Tayade C, Smith GN. Carbon monoxide increases utero-placental angiogenesis without impacting pregnancy specific adaptations in mice. *Reprod Biol Endocrinol*. 2020; 18 (1): 49. <https://link.springer.com/article/10.1186/s12958-020-00594-z>
29. Orellano P, Quaranta N, Reynoso J, Balbi B, Vasquez J. Effect of outdoor air pollution on asthma exacerbations in children and adults: Systematic review and multilevel meta-analysis. *PLoS One*. 2017; 12 (3): e0174050. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174050>
30. Clasen TF, Chang HH, Thompson LM, Kirby MA, Balakrishnan K, Díaz-Artiga A, et al. Liquefied Petroleum Gas or Biomass for Cooking and Effects on Birth Weight. *N Engl J Med*. 2022; 387 (19): 1735-1746. doi: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2206734>
31. Wan X, Wei S, Wang Y, Jiang J, Lian X, Zou Z, et al. The association between maternal air pollution exposure and the incidence of congenital heart diseases in children: A systematic review and meta-analysis. *Sci Total Environ*. 2023; 892: 164431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164431>
32. Li C, Yang M, Zhu Z, Sun S, Zhang Q, Cao J, et al. Maternal exposure to air pollution and the risk of low birth weight: a meta-analysis of cohort studies. *Environ Res*. 2020; 188: 109970. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109970>
33. Rengarajan A, Mauro AK, Boeldt DS. Maternal disease and gasotransmitters. *Nitric Oxide*. 2020; 96: 1-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.niox.2020.01.001>
34. Guerra DD, Hurt KJ. Gasotransmitters in pregnancy: from conception to uterine involution. *Biol Reprod*. 2019; 101 (1): 4-25. doi: <https://doi.org/10.1093/biolre/iox038>
35. Qian Z, Liang S., Yang S, Trevathan E, Huang Z, Yang R, et al. Ambient Air pollution and preterm birth: A prospective birth cohort study in Wuhan, China. *Int J Hyg Environ Health*. 2016; 219: 195-203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2015.11.003>
36. Guo P, Chen Y, Wu H, Zeng J, Zeng Z, Li W, et al. Ambient air pollution and markers of fetal growth: A retrospective population-based cohort study of 2.57 million term singleton births in China. *Environ Int*. 2020; 135: 105410. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105410>

37. Cândido da Silva AM, Moi GP, Mattos IE, Hacon, S.deS. Low birth weight at term and the presence of fine particulate matter and carbon monoxide in the Brazilian Amazon: a population-based retrospective cohort study. *BMC Pregnancy Childbirth*. 2014; 14: 309. doi: <https://doi.org/10.1186/1471-2393-14-309>
38. González-Lozano D, Henao-Navarro LD, Aristizábal-Zuluaga BH, Ruiz-Murcia FA. Exposición antenatal a contaminantes vehiculares y asociación con parto pretérmino en Colombia. *Rev Obstet Ginecol Venez*. 2023; 83 (2): 160-168. doi: <https://doi.org/10.51288/00830207>
39. Narváez-Enríquez NE, Henao-Navarro LD, Ruiz-Murcia A, Aristizabal-Zuluaga BH. Exposición prenatal al monóxido de carbono y material particulado y su asociación con preeclampsia, en Colombia. *Ginecol Obstet Mex*. 2022; 90 (9): 715-725. doi: <https://doi.org/10.24245/gom.v90i9.7886>
40. Escobar DA, Martínez S, Moncada CA. Relación entre PM10 y condiciones de accesibilidad territorial urbana en Manizales (Colombia). *Inf Tecnol*. 2016; 27 (6): 273-284. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000600027>
41. Arteaga Botero GA. Análisis de indicadores de densidad en el municipio de Manizales, Colombia. *Rev Ciudad Estados y Política*. 2015; 2 (1): 44-53. <https://perfilesycapacidades.javeriana.edu.co/es/publications/an%C3%A1lisis-de-indicadores-de-densidad-en-el-municipio-de-manizales/>
42. Cortés J, González CM, Morales L, Abalos M, Abad E, Aristizábal BH. PCDD/PCDF and dl-PCB in the ambient air of a tropical Andean city: Passive and active sampling measurements near industrial vehicular pollution sources. *Sci Total Environ*. 2014; 491-492: 67-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.113>
43. González CM, Gómez CD, Rojas NY, Acevedo H, Aristizabal BH. Relative impact of on-road vehicular and point-source industrial emissions of air pollutants in a medium-sized Andean city. *Atmos Environ*. 2017; 152: 279-289. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.048>
44. Cortés J, Cobo M, González CM, Abalos, M., Aristizábal, BH. Environmental variation of PCDD/Fs and dl-PCBs in two tropical Andean Colombian cities using passive samplers. *Sci Total Environ*. 2016; 568: 614-623. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.094>
45. Sigurdsson H, Carey S. Volcanic disasters in Latin America and the 13th November 1985 eruption of Nevado del Ruiz volcano in Colombia. *Disasters*. 1986; 10 (3): 205-216. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.1986.tb00590.x>
46. Ramírez Loaiza V, Zambrano Hernández LA, Gutiérrez Rodríguez MC, Carvajal A, Armijos T. Treinta años después de la erupción del volcán Nevado del Ruiz: Memorias, voces, reparación y escenarios de participación. *Rev Colomb Sociol*. 2017; 40: 45-64. doi: <https://doi.org/10.15446/rcs.v40n1.61948>
47. Grant ID, Giussani DA, Aiken CE. Fetal growth and spontaneous preterm birth in high-altitude pregnancy: A systematic review, meta-analysis, and meta-regression. *Int J Gynaecol Obstet*. 2022; 157 (2): 221-229. doi: <https://doi.org/10.1002/ijgo.13779>
48. Ha S, Zhu Y, Liu D, Sherman S, Mendola P. Ambient temperature and air quality in relation to small for gestational age and term low birthweight. *Environ Res*. 2017; 155: 394-400. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.02.021>
49. Kingsley SL, Eliot MN, Glazer K, Awad YA, Schwartz JD, Savitz DA, et al. Maternal ambient air pollution, preterm birth and markers of fetal growth in Rhode Island: results of a hospital-based linkage study. *J Epidemiol Community Health*. 2017; 71 (12): 1131-1136. doi: <https://doi.org/10.1136/jech-2017-208963>
50. Choe SA, Jang J, Kim MJ, Jun YB, Kim SY. Association between ambient particulate matter concentration and fetal growth restriction stratified by maternal employment. *BMC Pregnancy Childbirth*. 2019; 19 (1): 246. doi: <https://doi.org/10.1186/s12884-019-2401-9>

51. Jia L, Liu Q, Hou H, Guo G, Zhang T, Fan S, et al. Association of ambient air pollution with risk of preeclampsia during pregnancy: a retrospective cohort study. BMC Public Health. 2020; 20 (1): 1663. doi: <https://doi.org/10.1186/s12889-020-09719-w>
52. van den Hooven EH, de Kluizenaar Y, Pierik FH, Hofman A, van Ratingen SW, Zandveld, PY, et al. Air pollution, blood pressure, and the risk of hypertensive complications during pregnancy: the generation R study. Hypertension. 2011; 57 (3): 406-412. doi: <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.110.164087>
53. Pearce N. Analysis of matched case-control studies. BMJ. 2016; 352: i969. doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.i969>
54. Rose S, Laan MJ. Why match? Investigating matched case-control study designs with causal effect estimation. Int J Biostat. 2009; 5 (1). doi: <https://doi.org/10.2202/1557-4679.1127>