

Mortalidad Infantil en Menores de 5 años en Bogotá

Child Mortality in Children under 5 years of age in Bogota

Salomé Gómez, Samuel Monroy, Nicolás Oicata, and Danna Valbuena

Pregrado Ciencia de Datos Universidad Externado, Bogotá - Colombia

1. Resumen

Se analiza la tasa de mortalidad infantil en Bogotá en menores de 5 años, identificando factores que influyen en su variación por localidad. Se emplea un modelo bayesiano para segmentar y comprender estos aspectos. Los resultados muestran ser contradictorios, debido que a mayor pobreza hay menos muertes, mientras que un aumento en bebés con bajo peso aumenta considerablemente la mortalidad infantil. Además, un aumento en madres con régimen subsidiado de salud también incrementa la mortalidad, mientras que un mayor número de partos por cesárea la disminuye. El objetivo es contribuir a la implementación de políticas para reducir la mortalidad infantil en la capital.

Palabras clave: [Mortalidad infantil, Bogotá, desigualdades socioeconómicas, salud publica, modelos jerárquicos bayesianos.]

2. Abstract

The infant mortality rate in Bogota in children under 5 years of age is analyzed, identifying factors that influence its variation by locality. A Bayesian model is used to segment and understand these aspects. The results are contradictory, since the greater the poverty, the fewer the deaths, while an increase in low birth weight babies considerably increases infant mortality. In addition, an increase in mothers with subsidized health care also increases mortality, while a higher number of cesarean deliveries decreases it. The objective is to contribute to the implementation of policies to reduce infant mortality in the capital.

Key words: [Infant mortality, Bogota, socioeconomic inequalities, public health, Bayesian hierarchical models]

3. Introducción

La mortalidad infantil sigue siendo uno de los mayores retos de salud pública a nivel mundial, y su gravedad se refleja en cifras alarmantes. Según **Fondo de las Naciones**

Unidas para la Infancia [UNICEF] (2024), si no se toman medidas urgentes, 56 millones de niños y niñas menores de 5 años morirán antes de 2030, siendo la mitad de ellos recién nacidos. Para poner esta tragedia en perspectiva, basta con comparar este número con la población total de Colombia, que en 2023 era de aproximadamente 52.02 millones de personas (**Banco Mundial, 2023**). Esto implica que el número de muertes infantiles proyectadas para los próximos seis años superaría la población de un país entero, evidenciando la magnitud del problema y la necesidad urgente de intervención.

Sin embargo, no todo es desalentador, los avances en salud pública han permitido una significativa reducción de la mortalidad infantil en menores de 5 años. Según **UNICEF (2023)**, la tasa global ha disminuido en un 59%, pasando de 93 muertes por cada 1,000 nacidos vivos en 1990 a 38 en 2021. Esto refleja un impacto positivo en las intervenciones de la salud pública y demuestra que es posible avanzar en la lucha en contra de este desafío.

En Colombia, la mortalidad infantil ha mostrado una tendencia a la baja en las últimas décadas. Entre 2000 y 2021, la tasa de mortalidad infantil (TMI) se redujo en un 57.6%, pasando de 25.8 a 10.94 por cada mil nacidos vivos (**Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2022**). No obstante, como señala Durán (1999), esta disminución no se refleja de manera uniforme en todo el país, ya que en algunas regiones las tasas persisten en niveles muy altos, lo que evidencia la marcada desigualdad que existe en Colombia.

En 2023, varios departamentos registraron TMI superiores al promedio nacional, destacándose Guainía (32.32), Chocó (27.88), Vichada (18.55), entre otros (Así Vamos en Salud [AVS], 2024). Estas cifras subrayan la necesidad de implementar intervenciones focalizadas para abordar las disparidades regionales y garantizar una mejora equitativa en la salud infantil.

En Bogotá, durante el periodo de enero a junio de 2024, la tasa de mortalidad infantil (TMI) fue de 9.5 por cada 1,000 nacidos vivos (**Observatorio de Salud de Bogotá, 2024**), lo que representa una disminución del 11.3% en el número de casos con respecto al mismo periodo de 2023, según

datos de la Secretaría de Salud. Sin embargo, al analizar las localidades de la ciudad, persisten importantes disparidades. Entre las localidades con mayores tasas de mortalidad infantil se encuentran Sumapaz (250.0), Tunjuelito (22.6) y Usme (15.3), entre otras.

Estas localidades coinciden con las áreas de menores ingresos socioeconómicos. Por ejemplo, en Usme, el 52.2% de las manzanas corresponden al estrato 1, el 31.3% al estrato 2, y el resto no están estratificadas, lo que podría indicar asentamientos informales o invasiones (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2021). Esto refuerza la idea de que las desigualdades sociales en Colombia, visibles también en Bogotá, influyen significativamente en los indicadores de salud infantil.

En términos generales, aunque se observa una mejora en la TMI a nivel global, nacional y en la capital, persisten claras desigualdades entre regiones y niveles socioeconómicos. Además, como señala el World Economic Forum (2024), los niños nacidos en los hogares más pobres, en zonas vulnerables o afectadas por el conflicto tienen menos probabilidades de sobrevivir más allá de los cinco años. Abordar estas desigualdades no solo es una cuestión de salud pública, sino también un desafío ético y social que requiere una atención integral y sostenida.

El objetivo general de este estudio es desarrollar un modelo jerárquico para analizar los factores que afectan la mortalidad infantil en Bogotá. Este enfoque puede llegar a mejorar la comprensión de las determinantes del sistema de salud en diferentes localidades y evaluar cómo el acceso a servicios, las condiciones socioeconómicas y las características maternas, como la edad y el tipo de parto, influyen en las tasas de mortalidad infantil. A través de este modelo, se pretende identificar las problemáticas que enfrenta el sistema de salud y reconocer qué localidades padecen más respecto a este indicador.

Por esto mismo, la pregunta de investigación es ¿Qué factores explican los cambios en la tasa de mortalidad en menores de 5 años con respecto a las localidades de Bogotá D.C a lo largo del periodo de 2012 a 2022?

4. Marco Teórico

Los Institutos Nacionales de Salud (2016) definen la tasa de mortalidad infantil como la cantidad de muertes de menores de 5 años por cada 1000 nacidos vivos, siendo un factor de vital importancia para comprender las características sociales y sanitarias propias de una comunidad, dado que, “muchos factores que contribuyen a las muertes de los bebés también afectan la salud de la población en general” (Centros para el Control y Prevención de Enfermedades [CDC],

2012).

De hecho, Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [UNICEF] (2024) recalca que, en la actualidad sobreviven más niños que nunca a nivel mundial, descendiendo en un 51% desde los 2000, señalando además que este comportamiento se debe principalmente a un desarrollo en las condiciones sanitarias, sociales y alimenticias, que han garantizado el acceso gratuito y de calidad a los servicios de salud.

No obstante (UNICEF) (2024) y (CDC) (2024) también indican que aún hay un extenso camino por recorrer en esta materia; por ejemplo, en 2019 hubo 4,9 millones de defunciones infantiles de las cuales la mayoría fueron producidas por causas evitables, por lo anteriormente mencionado, se presenta casos en donde las muertes de los menores se pueden prevenir, puesto que los motivos se ven reflejados en “la insuficiencia en salud pública, soporte nutricional y deficiencias en el acceso a un servicio de salud.” (Universidad de los Andes, s.f, p.1), en donde la tasa de mortalidad genera preocupación en la sociedad debido a las insuficiencias en las prestaciones hospitalarias que afectan directamente a la problemática.

La mortalidad infantil temprana en Latinoamérica está muy por encima del promedio en comparación con el registro de la tasa de mortalidad en Europa o Norteamérica, reflejando una desigualdad significativa en términos de supervivencia infantil (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2011). Este indicador es un reflejo de las condiciones de vida, y las diferencias de desarrollo de cada país, por ese motivo, se presentan desigualdades en el acceso a una atención de salud, generando distinción que del mismo modo afectan a la vida digna de los infantes, esta realidad impacta las tasas de mortalidad infantil (Naciones Unidas, 2018).

Como se menciona en Latinoamérica, Colombia se evidencia como un caso crítico por obtener la tasa más alta de mortalidad infantil entre los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE] (Salazar, 2024). Aunque el país ha conseguido un progreso en la disminución de esta tasa, aún existen notables desigualdades que han aumentado entre las regiones, y que están relacionadas con condiciones de pobreza, la cual afecta notablemente a las muertes de los infantes a medida que se incrementa la problemática socioeconómica (Alvis et al., 2015). Estas diferencias demuestran cómo los recursos y el acceso a servicios de salud varían en el país, lo cual, afecta mayormente a las zonas más pobres y se vea afectada la vida de los menores.

La elección de Bogotá como foco de estudio se justifica no solo por su relevancia en el ámbito de la salud pública,

como lo señala Rico (2021), quien destaca que la capital de Colombia sigue liderando en competitividad en el sector de la salud, sino que también, por las desigualdades en mortalidad infantil observadas en distintas zonas de la ciudad. Según la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá (2023), localidades en desventaja como Usme, Ciudad Bolívar, Santa Fe, Bosa y otras, enfrentan desafíos en términos de acceso a servicios de salud e ingresos. Esto contribuye a la persistencia de altas tasas de mortalidad infantil y la concentración de desigualdades en la salud. Comprender los factores que recaen en la mortalidad en menores de 5 años en Bogotá brinda información clave para desarrollar programas de salud ajustados a las particularidades de cada zona, permitiendo un análisis de cómo la calidad y disponibilidad de los servicios de salud impactan a la vida digna infantil en diversos contextos.

Del mismo modo se observan distintos factores relevantes que influyen a la tasa de mortalidad en menores de 5 años, tales como:

La variable bajo peso al nacer utilizada en el estudio, es definida por Datos Abiertos Bogotá (2024), como la proporción de recién nacidos vivos en Bogotá D.C. cuyo peso es inferior a 2,499 gramos. Estos datos coinciden con la definición estándar de bajo peso al nacer, que se refiere a los bebés cuyo peso es menor a 5 libras y 8 onzas al momento del parto, a diferencia del peso promedio de un recién nacido que es aproximadamente 7.5 libras (Stanford Medicine Children's Health, s.f.)

“El peso al nacer es un indicador fundamental para evaluar la vida infantil, donde el riesgo de mortalidad es considerablemente más alto en recién nacidos con muy bajo peso. Según estudios, los bebés en esta categoría tienen hasta 200 veces más probabilidades de fallecer en comparación con aquellos que nacen con un peso adecuado” (Castro, et. al, 2016). Por lo cual se enfatiza la importancia del bajo peso al nacer como una variable clave en el estudio de la mortalidad infantil. Cuando el peso de un recién nacido es significativamente bajo, se incrementa su vulnerabilidad ante diversas complicaciones de salud. De hecho, se estima que el BPN afecta a 1 de cada 6 niños en el mundo, convirtiéndose en un grave problema de salud pública al representar la segunda causa de muerte perinatal (Mestre y Velásquez, 2023).

El bajo peso al nacer (BPN) es un indicador crucial que se vincula no solo con el estado de salud neonatal, sino que también con factores socioeconómicos como la pobreza. (Núñez & Morice, 1990).

La relación entre BPN y pobreza se observa en distintos entornos como lo menciona Castaño et al. (2020), en los contextos más pobres y menos desarrollados, esta situación, además de ser un reflejo de las desigualdades sociales, tiene

un impacto profundo en las tasas de mortalidad infantil.

La pobreza monetaria se define como el costo per cápita mínimo para cubrir una canasta básica de bienes y servicios, tanto alimentarios como no alimentarios, en una región específica. (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2024). La variable pobreza se empleará bajo esta definición. Este factor permite analizar las condiciones económicas en función de las necesidades básicas de diferentes lugares y se empleará como un componente para la tasa de mortalidad infantil, permitiendo identificar de qué manera la afecta.

La pobreza es un factor determinante, como anteriormente se mencionó, en la relación con bajo peso al nacer y en la tasa de mortalidad infantil, ya que, el lugar de nacimiento está vinculado con las condiciones socioeconómicas, el cual influye directamente en la calidad de vida de los niños. Como señala UNICEF (2022), “El lugar donde nace un niño no debe determinar si vive o muere”, sin embargo, los infantes en condiciones vulnerables tienen dificultades para acceder a servicios de salud de calidad, lo que aumenta su riesgo de padecer enfermedades que podrían prevenirse con los servicios adecuados UNICEF (2022).

Además, estudios señalan que los niños en hogares con escasos recursos tienen el doble de posibilidades de morir antes de cumplir los 5 años, en comparación con aquellos que nacen en lugares con mejores condiciones (UNICEF, 2022). Esta situación se debe, en parte, a que la pobreza, como lo menciona CEPAL (2020), también limita el acceso a servicios básicos como agua potable y saneamiento, lo cual, agrava la situación de los infantes en lugares vulnerables. La CEPAL (2020) advierte que estas carencias aumentan la probabilidad de la mortalidad infantil, ya que, los menores en estos entornos son altamente vulnerables y están expuestos a contraer enfermedades.

El régimen subsidiado tiene un impacto en la mortalidad infantil debido a las características que lo definen, como lo señala Carrillo (2021), al nombrar que la mayoría de los casos se concentran en menores de un año pertenecientes a este régimen, que son principalmente la población de estratos socioeconómicos bajos (1 y 2), en donde, se identifican limitaciones económicas que dificultan un buen acceso a servicios de salud, además de deficiencias en la calidad de las prestaciones. Por estas razones, es importante analizar cómo estas limitaciones afectan las desigualdades en el acceso a la salud y dan paso a tener tasas de mortalidad infantil elevadas en esta población.

De igual manera, el régimen subsidiado está vinculado a factores de calidad, como lo señala Mejía et al. (2017), al destacar que, “se debe definir políticas para mejorar la accesibilidad de la población materno-infantil del régimen

subsidiado en iguales condiciones de calidad.” (p.8), por lo cual, resalta la importancia de enfocarse en dicha población y generar solución para disminuir la mortalidad infantil.

Otro factor determinante es el impacto de las participaciones medicas en el momento de los nacimientos. La mortalidad neonatal, por ejemplo, tiende a ser mayor en partos por cesárea en comparación con los partos vaginales (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2015). Del mismo modo, esta decisión de escoger el modo de nacimiento es afectada por múltiples decisiones fuera de las médicas, como lo indica Healthwise (2024) algunas mujeres tienen razones personales para realizarse un parto por cesárea sin estar completamente conscientes de los riesgos. En donde este tipo de intervenciones puede presentar mayor riesgo al infante, mayormente cuando se realizan sin una necesidad medica clara.

Sin embargo, en América Latina, la tasa de cesáreas asciende a un 44.3 %, mucho más alta que el rango recomendado el cual es del 10% y el 15% por la OMS (Ojeda, 2019), lo que refleja una tendencia preocupante. Esta práctica excesiva de cesáreas puede contribuir indirectamente a una mayor mortalidad neonatal, especialmente en contextos donde la intervención médica no es apropiadamente indicada, afectando la salud de los nacidos. (Sadler, 2018)

El parto por cesárea representa un factor de riesgo significativo para la mortalidad infantil. Según la Coalición para mejorar los servicios de maternidad [CIMS] (s.f.), los nacidos por cesárea programada tienen mayores probabilidades de ser extraídos antes de que estén completamente listos para nacer, lo que puede generar complicaciones respiratorias y alimenticias, además, los bebés que nacen por cesárea tienen menos probabilidades de ser amamantados. Por lo cual compromete aún más su salud, su desarrollo y sano crecimiento. En conjunto, estos factores resaltan que la cesárea, si no se realiza bajo una necesidad médica, puede afectar la salud de los neonatos y aumentar la mortalidad infantil.

Según lo establecido previamente, la mortalidad infantil continúa siendo un procedimiento de salud que afecta a múltiples familias a nivel global, incluso con el avance que ha tenido el sector hospitalario. Tal como señala la OMS (2024), “cada año millones de familias siguen sufriendo la devastadora angustia que supone perder a un hijo, a menudo en los primeros días de vida”. Esta cita señala la importancia de seguir estudiando las causas y los factores que aportan a este problema.

En este sentido, es fundamental analizar la mortalidad infantil desde una perspectiva social y demográfica para profundizar su análisis e interpretación. Como menciona

Bobadilla et. al (s.f) “El estudio de la mortalidad infantil por diferentes factores sociales y demográficos es esencial para investigadores y planificadores de salud”. Este enfoque permite identificar las causas del problema, sin embargo, comprender totalmente la mortalidad infantil y proponer medidas para reducirla sigue siendo complejo. Puesto que, en los antecedentes mencionados, la mortalidad infantil es una problemática que afecta a millones de personas, a pesar de los avances logrados. Por este motivo, es crucial continuar estudiando sus causas y las desigualdades asociadas.

5. Metodología

Este estudio tiene un enfoque cuantitativo, explicativo y longitudinal, basado en el análisis de datos de la mortalidad infantil en menores de 5 años en las localidades de Bogotá entre 2012 y 2021. Se utilizó un modelo jerárquico bayesiano para explorar las diferencias territoriales en las TMI, así como los factores asociados a estas.

La población objetivo en este análisis son los niños menores de 5 años, en especial los niños recién nacidos residentes en las 20 localidades de Bogotá, como se mencionó anteriormente lo datos abarcan un período de 10 años (2012-2021). Cabe mencionar, que los conjuntos de datos fueron unidos por medio del año y la localidad.

Fuente de Datos.

Los datos utilizados en este estudio fueron obtenidos de diversas fuentes disponibles en la página oficial de datos abiertos Bogotá, en la sección de salud y protección, esta fuente brinda información relevante sobre salud y demografía en la ciudad, conectándolos mediante indicadores clave en la mortalidad infantil, para así al final unificarlos por medio del año y la localidad, de esta manera, se obtuvo un dataset con 220 filas y 13 columnas. Para un detalle completo de las fuentes específicas, consultar en el Apéndice A.1.

Variables Analizadas

Las variables clave en este estudio son: bajo peso al nacer, partos por cesárea, tasa de pobreza, régimen subsidiado, año, área y, finalmente, la tasa de mortalidad infantil. La relevancia de cada una de estas variables se detalla en el marco teórico. Para obtener información más específica sobre ellas, consulte el Apéndice A. 2.

5.1 Análisis Descriptivo

Los detalles completos de las estadísticas descriptivas de los datos, organizados según las variables seleccionadas para el modelo, se encuentran en el Apéndice A. 3.

Respecto a la normalidad y simetría de las variables se observó que ninguna de ellas cumplía estos requisitos; sin embargo, al aplicar logaritmo natural sobre los datos específicamente los correspondientes a las tasas, se evidenció un cambio en su distribución, acercándose a la simetría y forma de montículo; no obstante, al realizar la prueba de Shapiro - Wilk para probar normalidad, únicamente 'Tasa de Pobreza' se consideró normal.

5.2 Presentación de Gráficas

Con el fin de analizar las diferentes correlaciones existentes entre las variables se realizaron múltiples gráficas que son útiles para la explicación de los fenómenos asociados a los objetivos de este estudio.

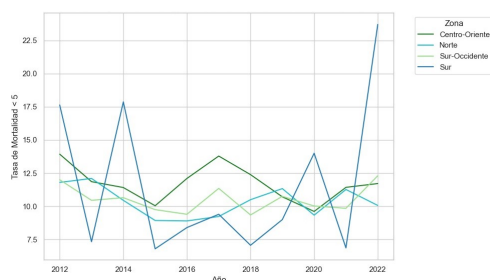


Fig. 1. Tasa de Mortalidad en Menores de 5 Años por Zona (2012-2022)

En primera instancia, se agruparon las localidades por zonas asociadas a las subredes de prestación de salud en Bogotá en donde se dividieron de la siguiente manera:

- **Subred Sur:** Usme, Ciudad Bolívar, Tunjuelito y Sumapaz
- **Subred Sur Occidente:** Bosa, Kennedy, Fontibón y Puente Aranda.
- **Subred Norte:** Usaquén, Teusaquillo, Chapinero, Barrios Unidos, Engativá y Suba.
- **Subred Centro Oriente:** Santa Fe, San Cristóbal, Los Mártires, La Candelaria, Antonio Nariño y Rafael Uribe Uribe.

Teniendo en cuenta esto, se puede observar que la tasa de mortalidad en la Subred Sur es bastante volátil en comparación con la Subred Sur Occidente, la cual tiene un comportamiento relativamente constante, de igual manera, se presentan picos relevantes en los años 2014, 2017, 2020 y 2022; que según autores como Álvarez (2017) son causados por situaciones socioeconómicas y factores gubernamentales, del mismo modo, se observa una gran diferencia respecto a las defunciones en las zonas Norte en la cual tiene

menos casos que en la zona Sur, en esta medida, se considera de vital importancia determinar el impacto de la tasa de pobreza en la mortalidad y condiciones de vida de los infantes, atendiendo a las condiciones de desigualdad que afrontan estas áreas.

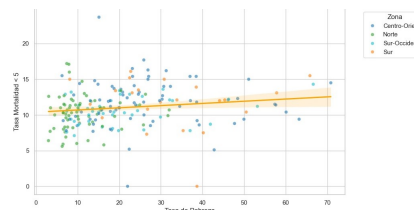


Fig. 2. Relación entre Tasa de Pobreza y Tasa de Mortalidad por zona

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, la tasa de pobreza es un elemento crucial para el estudio de la tasa de mortalidad en menores, dado que, entre estas dos variables existe una correlación positiva evidenciable en la figura 2, particularmente se observa que la zona Norte presenta tasas de pobreza más bajas que indican menos casos de fallecimientos infantiles. Longhi (2011) Explica esta relación de la siguiente manera:

El concepto de enfermedades de la pobreza es de este modo una noción central para interpretar el nexo entre la mortalidad infantil y la pobreza. Está claro que cuanto más extrema se torne la condición de pobreza, mayor importancia ha de cobrar la mortalidad infantil (párr. 16).

En esa medida la pobreza engloba múltiples problemas que se pueden traducir en accesos limitados a servicios, la malnutrición, baja calidad de vida, mayor riesgo de enfermedades, etc, de hecho Herrera& Merizalde (2022) señalan que la malnutrición materna es el causante de complicaciones en la salud de los infantes, como bajo peso al nacer, retraso en el crecimiento y morbilidad.

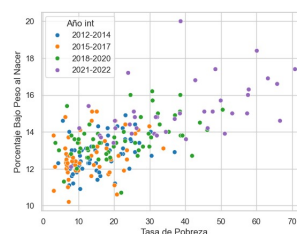


Fig. 3. Relación entre Tasa de Pobreza y Porcentaje de Bajo Peso al Nacer por intervalos de año (2012-2022)

Tal como se muestra en la figura 3, existe una fuerte correlación entre la pobreza y el bajo peso de los recién nacidos, confirmando lo expuesto por Herrera & Merizalde (2022) anteriormente citadas; esto permite establecer una conexión indirecta entre el bajo peso de los nacidos y la mortalidad en menores, ya que, es causante de múltiples enfermedades como asfixia perinatal, hipoglucemia, inmadurez, entre otros (Velázquez et al, 2004); de igual manera en la gráfica se ve reflejado un aumento en los casos de bajo peso al nacer con el paso del tiempo, de hecho Peña (2019) menciona que Colombia en los últimos años ha tenido un gran aumento de estos incidentes en comparación con el mundo, esto en consecuencia de múltiples factores externos, muchos de ellos asociados a la salud materna, condiciones sociales y geográficas (Ministerio de Salud de Colombia, 2021; Avelino et al., 2020).

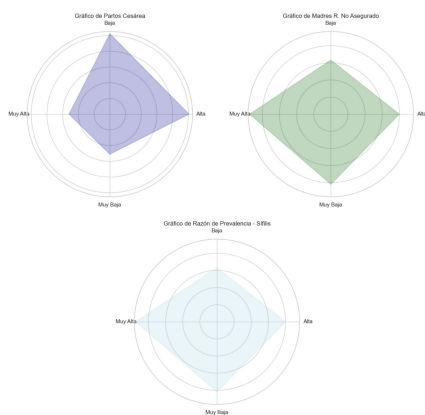


Fig. 4. Relación entre Partos por Cesárea, Razón de prevalencia de Sífilis y Madres con Régimen no Asegurado con la Mortalidad Infantil

Para el desarrollo de la figura 4 se transformó la Tasa de Mortalidad < 5 , en cuatro rangos teniendo en cuenta los cuartiles de la distribución de la variable de la siguiente manera:

- Muy bajo ≤ 9.175
- $9.175 < \text{Bajo} \leq 11$
- $11 < \text{Alto} \leq 12.725$
- Muy alto > 12.72

De esta forma revisar factores externos es fundamental para el estudio de la mortalidad infantil, por ejemplo:

- El tipo de parto, sobre el cual Furzán (2014) indica que "La tasa de mortalidad neonatal es 2,4 veces más elevada entre niños nacidos por cesárea electiva que en los nacidos por vía vaginal", fundamentando la primera

gráfica de la figura 4, en donde se refleja una alta tasa de mortalidad infantil asociadas a los partos por cesárea.

- El tipo de afiliación al sistema de salud, ya que, como lo menciona Ministerio de Salud de Colombia (2021) "el régimen no asegurado muestra una tendencia al aumento de la proporción de Bajo peso neonatal" que va de la mano con la segunda gráfica de la figura 4 que indica un alto riesgo de mortalidad de los menores asociado a que la madre no presenta un cubrimiento a su salud.
- Otro factor de vital importancia es la sífilis congénita que trae graves consecuencias al nacido, cuando la madre padece de esta enfermedad, ya que se la transmite directamente, tal como señala Rosa et al. (2014) "La infección sifilítica en una mujer embarazada no tratada, usualmente causa en el feto sífilis congénita, que en el 40% de los casos termina en muerte al bebé (...) o secuelas importantes en los sobrevivientes como ceguera, deformidades óseas y dentarias", lo cual va de la mano con la gráfica 4, que señala una mortalidad muy alta.

En general se evidencia que las variables anteriormente mencionadas afectan de manera significativa al aumento o descenso de la mortalidad infantil, ya que, contemplan diferentes aspectos tanto internos (Por ejemplo la sífilis), como externos (La tasa de pobreza) que influyen en el fenómeno de interés, por tal motivo se consideran estas variables relevantes para la ejecución del modelo.

5.3 Transformaciones de variables

Para este estudio se realizaron dos transformaciones con el fin de completar y hacer más significativas ciertas variables, y otras dos como parte del preprocesamiento de los datos para el modelo.

5.3.1 Interpolación sobre la tasa de pobreza

Originalmente el conjunto de datos que contenía esta variable solo registraba información de los años 2014, 2017 y 2021, sin embargo para emparejar los Dataset se requería desde el año 2012 hasta el 2022, por lo cual, se realizó una interpolación de Lagrange agrupando por localidad. Este método es óptimo para estimar valores intermedios dentro de un rango de los datos, lo cual se ajusta con el problema anteriormente mencionado. (Rosas et al., 2019)

Siguiendo lo indicado por Rosas et al. (2019), la interpolación de Lagrange es una técnica utilizada para ajustar una función a un conjunto de puntos, para estimar el comportamiento de los valores desconocidos en su tendencia, esto

lo hace través de la siguiente formula:

$$f_n(x) = \sum_{i=0}^n L_i(x) f(x_i)$$

$$L_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}$$

$$f_1(x) = \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} f(x_0) + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} f(x_1)$$

Al aplicar la formula n veces (siendo n la cantidad de datos), se obtiene un polinomio de grado n-1 o menor, el cual es utilizado para estimar los datos faltantes.

5.3.2 Construcción de la tasa de crecimiento poblacional

El conjunto de datos contenía información sobre la cantidad de mujeres en edad fértil por cada localidad desde 2005 hasta el 2023, esto conlleva a un problema ya que, no se tiene una medida estándar al comparar por sectores, por lo que se decidió crear una nueva variable en la cual captara el porcentaje de variación en la población de un año respecto al anterior. De acuerdo con el Centro Centroamericano de Población [CPP] (s.f.) la tasa de crecimiento poblacional se define como la variación porcentual de la población en un año determinado y se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Crecimiento}(\%) = \frac{\text{Año actual} - \text{Año anterior}}{\text{Año anterior}} \times 100 \quad (1)$$

A partir de esta fórmula se hizo el cambio de la variable de población a la tasa de crecimiento por año.

5.3.3 Aplicación de logaritmo natural

Dado que la distribución normal es más fácil de computar y aproximar para el modelo, al observar el comportamiento aproximadamente exponencial de algunas variables, se decide aplicar logaritmo natural sobre ellas con el fin de aproximarlas a un montículo, a la vez de facilitar la interpretabilidad a nivel porcentual.

Además, esta transformación también se aplicó para la variable objetivo debido su comportamiento aproximadamente exponencial, lo que a su vez facilitaría interpretar los resultados de la regresión en términos porcentuales; lo anterior sumado a que tras la ejecución de múltiples modelos de prueba se identificó que el logaritmo natural sobre la TMI

mejoraba la convergencia y rapidez de cómputo de la simulación respectiva.

La transformación se aplicó sobre la tasa de pobreza, las madres del régimen subsidiado y la razón de prevalencia de sífilis. Tras realizar la prueba de hipótesis con D'Agostino y Anderson-Darling, no se obtuvo rechazo a la hipótesis nula para la tasa de pobreza, la TMI y las madres del régimen subsidiado; sin embargo, se preservó la transformación para todas las variables dado que aproximaba la distribución respectiva a un montículo.

5.3.4 Estandarización

Como menciona Sharma (2022) "Las variables de entrada no escaladas pueden generar un proceso de aprendizaje lento o inestable" (p.4), por tanto, con el fin de facilitar la convergencia y optimizar este proceso se aplicó estandarización sobre todas las variables regresoras, definidas de la siguiente manera:

$$X_{est} = \frac{X - \bar{X}}{\sigma_X} \quad (2)$$

Cabe resaltar que la estandarización le añade una capa de complejidad a la interpretabilidad del modelo, lo que aplicado sobre transformaciones logarítmicas podría dificultar la lectura de los resultados del estudio; por tal motivo, tras obtener un modelo convergente, se desestandarizaron las β_i para interpretarlas desde sus unidades originales.

5.4 Presentación del modelo

El análisis exploratorio de datos presentado previamente permitió identificar que existen diferencias en el comportamiento de las variables entre las localidades de Bogotá; es decir, la tasa mortalidad infantil varía según la zona de la ciudad en la que se enfoque, por lo que es fundamental tener en cuenta las diferencias y particularidades de cada una de estas áreas a la hora de modelar este fenómeno, sin olvidar que se deben considerar las interdependencias y relaciones entre ellas para comprender en términos generales como se ha comportado este indicador en los últimos años.

De hecho, múltiples investigaciones e informes académicos que han desarrollado la tasa de mortalidad infantil destacan la importancia de estudiar este indicador desde la agrupación de unidades geográficas (países, departamentos, municipios o provincias) con el fin de determinar las diferencias entre cada una de las áreas e integrar medidas más significativas que atiendan las necesidades locales (Data for Impact [D4I], s.f.; Giraldo et al., 2017; Vega et al., 2006).

Siguiendo este enfoque, Alkema & Ling (2011) utilizaron un modelo jerárquico bayesiano para estimar la tasa de mor-

talidad infantil en 165 países debido a la escasez de datos al respecto y la necesidad de captar relaciones entre los países vecinos, permitiendo "un método alternativo para estimar la mortalidad de los menores de cinco años, en el que se permite que la tasa de cambio subyacente varíe suavemente a lo largo del tiempo" (Alkema & Ling, 2011, p.1)

En esta medida, dadas las condiciones del conjunto de datos que se está empleando, donde por cada localidad hay apenas 11 registros (1 por año) y se desea de modelar las características propias de cada área para realizar el análisis comparativo de interés, se decide implementar un modelo jerárquico bayesiano, el cual ha sido utilizado previamente para el estudio de la mortalidad infantil, permitiendo determinar las relaciones existentes entre una serie de variables incorporadas en múltiples niveles.

5.4.1 Modelo Jerárquico Bayesiano

Los modelos jerárquicos se fundamentan en la idea del *partial pooling*, una aproximación para modelar problemas de categorías donde cada subgrupo se considera único pero proveniente de una distribución común, conteniendo información útil de otros subgrupos (Johnson et al., 2022).

Básicamente, su estructura se construye a partir de jerarquías, donde cada una de ellas corresponde a un subgrupo que se desea modelar, permitiendo al final obtener un valor estimado para cada parámetro de cada nivel, tal como se identifica en la figura 5.

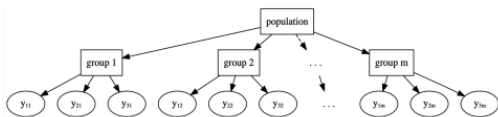


Fig. 5. Arquitectura de un modelo jerárquico. Tomado de *Bayes Rules! An Introduction to Applied Bayesian Modeling* (p. 383), por Johnson et al., 2022, Chapman and Hall/CRC

Priors

De acuerdo con Johnson et al. (2022) se definen las priors de un modelo jerárquico a partir de una serie de niveles:

Nivel 1: Corresponde a la componente *no pooled* del modelo, donde se define en particular para cada subgrupo la distribución prior respectiva de la variable que se desea analizar a partir de las jerarquías. En el caso de este estudio se define para la tasa de mortalidad infantil para cada localidad. Se define como:

$$Y_{ij} | \mu_j, \sigma_y \sim \mathcal{N}(\mu_j, \sigma_y^2) \quad (3)$$

Donde μ_j corresponde la media esperada prior de la tasa de mortalidad infantil para cada localidad y σ_y a la variabilidad de este indicador (como varía anualmente dentro de cada localidad)

Cabe resaltar que, podría implementarse un enfoque totalmente jerárquico; es decir, donde tanto la variable objetivo como las predictoras tengan un componente *no pooled*, permitiendo analizar incluso las diferencias desde factores como la tasa de pobreza o la tasa de fecundidad; no obstante, dadas las limitaciones computacionales se optó por modelar los predictores como *complete pooled* (definiendo una sola estimación para toda la ciudad) y únicamente la objetivo como una *partial pooled* (definiendola tanto para toda la ciudad como para cada localidad).

Nivel 2: Componente que une el *no pooling* con el *complete pooling*, captando las relaciones entre los subgrupos. En este caso, se definen priors para las variables que se tratarán con enfoque *partial pooling*, indicadas matemáticamente como:

$$\mu_j | \mu, \sigma_\mu \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma_\mu^2) \quad (4)$$

Donde μ corresponde a la media global que une a los subgrupos (en este caso, Bogotá, dado que agrupa todas las localidades) y σ_μ a la variabilidad entre los subgrupos (como cambia la tasa de mortalidad de una localidad a otra).

Nivel 3: Corresponde al componente *complete pooled* del modelo; es decir, la agrupación más general que se pueda hacer de él y que contenga todos los subgrupos a estudiar. En este caso corresponderá a Bogotá. También se considera el efecto de los regresores, por lo que se incluyen en esta capa. De esta manera se tienen los parámetros μ , σ_{μ} , β_i y σ_y , todos ya definidos en los niveles anteriores.

Detállese que las distribuciones de cada nivel definen los parámetros de las priors del nivel anterior; por ejemplo, μ_j definido en el nivel 2 es el utilizado para definir Y_{ij} en el nivel 1, de igual manera, los parámetros globales del nivel 3 forman el nivel 2 y así sucesivamente. Precisamente esta manera de reutilizar las distribuciones ya creadas para formar otras más complejas es lo que le da el nombre de 'jerárquico'.

Likelihood

Análogo a cualquier modelo de regresión, en el caso jerárquico se buscan determinar los betas que definen el hiperplano (en este caso los hiperplanos) que modelan el fenómeno, motivo por el cual se debe construir la ecuación a partir de las priors respectivas y los datos:

$$Y \sim \beta_0 + X_1\beta_1 + X_2\beta_2 + \dots + X_n\beta_n \quad (5)$$

Donde el β_{0j} corresponde a la prior *partial pooled* para la tasa de mortalidad y X_i los datos respectivos para la variable modelada por el coeficiente β_i . Esta ecuación corresponde a la media de la distribución Likelihood del modelo. De esta manera, se pueden aproximar los datos a una Likelihood normal definida tal que:

$$Y | X, \beta_i \sim \mathcal{N}(\beta_{0j} + X_1\beta_1 + X_2\beta_2 + \dots + X_n\beta_n, \sigma^2) \quad (6)$$

Cabe aclarar que σ^2 puede definirse bajo distribuciones como la HalfNormal, HalfCauchy o Exponential según las características propias de los datos o las necesidades de convergencia del modelo.

Posterior

A partir de las priors y Likelihood previamente definidos, mediante un método de simulación se aproximan las posteriors de cada parámetro definido en cada nivel; es decir, en este caso se espera obtener la estimación de la distribución para los β_i de cada regresor, los β_0 (o μ_j) que corresponde a la tasa de mortalidad para cada localidad, un β_{glob} (o μ) para la tasa de mortalidad de Bogotá y sus respectivas σ .

5.5 Planteamiento del modelo

Teniendo en cuenta la arquitectura, transformaciones (particularmente la aplicación del logaritmo natural sobre la tasa de mortalidad infantil) y las características previamente presentadas, se definen las priors, el método de simulación y otros hiperparámetros utilizados para el entrenamiento del modelo y aproximación a las posteriors.

5.5.1 Priors

Se definen las distribuciones prior tal como se muestra en el Apéndice B.1.

El uso extendido de la Normal para todos los β_i se debe principalmente a la facilidad computacional para aproximar este tipo de distribuciones y a la forma de montículo que se detalló en algunas variables en el análisis exploratorio de datos, buscando un modelo convergente, pero que no requiriera gran cantidad de recursos de procesamiento teniendo en cuenta las limitaciones en que se desarrolló el modelo.

Para el caso de σ_μ se utilizó HalfNormal dado que autores como Gelman et al. (2006) señaló que su uso centrándola en cero y con una desviación alta es apropiada para parámetros de varianza que modelan fenómenos de priors poco informativas, lo que se ajusta a las condiciones de la variabilidad entre los β_i

σ_y se define con una HalfCauchy. Gelman et al. (2006) recomienda esta distribución para priors no informativas o débiles en modelos jerárquicos con pocos subgrupos, características que se identifican en los hiperparámetros y el conjunto de datos.

5.5.2 Likelihood

La likelihood se construyó tal como se define en la sección 3.4.1. Modelo Jerárquico Bayesiano, con base en las priors previamente planteadas y el conjunto de datos que se especificó.

5.5.3 Aproximación a la Posterior y Método de Simulación

El Hamiltoniano Monte Carlo (HMC) es un método de simulación que consiste en generar un área de aceptación a la que se busca que convergan una serie de iteraciones aleatorias mediante un proceso de optimización de Leapfrog, implementando un vector de momentos que guía la dirección de la trayectoria hacia esta zona (Camón Alejandro, 2022).

De acuerdo con McElreath (2020), "HMC es más costoso computacionalmente que el Metrópolis o el Muestreo de Gibbs. Pero para sus propósitos es mucho más eficiente. En consecuencia, HMC no requiere tantas muestras para describir la posterior, por lo que necesita menos tiempo" (p.271). Asimismo, McElreath (2020) señala que ante modelos altamente complejos este método de simulación destaca al brindar resultados ante escenarios que otros algoritmos no convergerían o serían altamente ineficientes.

Tras experimentar con otros algoritmos como el NUTS o el Metrópolis, se obtuvo que este fue el más óptimo y de hecho, el único que convergió teniendo en cuenta la arquitectura y complejidad implícita en el modelo desarrollado.

EL algoritmo HMC se detalla en el Apéndice C.1.

5.5.4 Hiperparámetros de la Simulación

La simulación del modelo fue realizado mediante el paquete de Python PyMC, el cual ofrece una serie de funciones y comandos especializados en la construcción de modelos bayesianos.

Tras realizar variedad de pruebas de simulación en búsqueda de los hiperparámetros óptimos para la convergencia del modelo dadas las limitaciones computacionales que se presentaban, se definieron finalmente los siguientes valores con base en los requerimientos del paquete de Python para la ejecución:

- **Número de muestras:** 1000

- **Cadenas de Markov:** 4
- **Tasa de Aceptación:** 0.95
- **Init:** "jitter+adapt.diag"

5.6 Convergencia del Modelo

Para analizar la convergencia del modelo se detalló el R-hat y la visualización de diversas gráficas con el fin de identificar posibles problemas de autocorrelación o divergencias en alguna parte del muestreo.

Inicialmente se destaca que para todos los parámetros se obtuvo un R-hat de 1, lo que indica en general que las cadenas han convergido y las distribuciones obtenidas corresponden a la posterior buscada.

Por otro lado, la figura 6 muestra la convergencia a través de las iteraciones del parámetro global (de Bogotá) de la tasa de mortalidad infantil, mostrando que a medida que aumentan las iteraciones y con el paso de las cadenas, el valor de la media converge hacia un valor específico sin demasiado ruido.

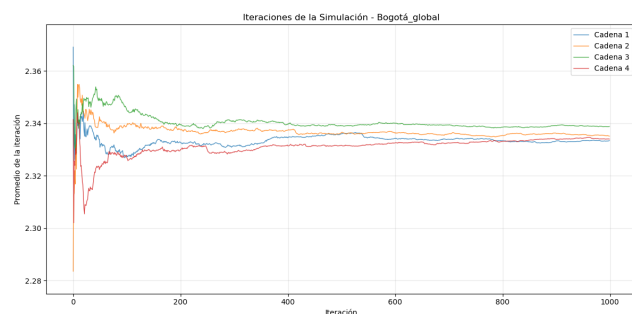


Fig. 6. Iteraciones y cadenas sobre μ

De igual forma, la figura 7 muestra la gráfica de la traza para la tasa de mortalidad de cada localidad, identificando la forma de ruido aleatorio (que indica no autocorrelación) y ninguna tendencia particular. Además no existen vacíos ni líneas negras que indiquen divergencias en alguna iteración. En general los resultados obtenidos son fiables y están bien formados.

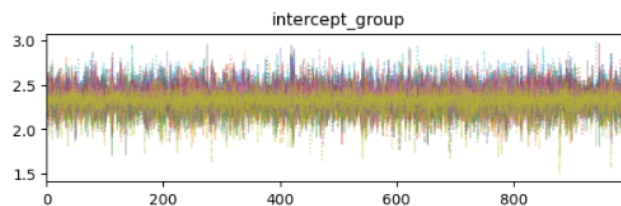


Fig. 7. Gráfico de Traza para la tasa de mortalidad infantil por localidad

En el Apéndice D se detallan los gráficos de traza para todos los parámetros, mostrando la convergencia deseada para todos ellos.

6. Resultados

Para evaluar la calidad de ajuste del modelo se analizaron principalmente tres métricas: RMSE, MAE y R^2 , obteniendo valores de 0.63, 0.27 y 0.154 respectivamente. En general, se detalla que el modelo comete errores y logra captar parte de la variabilidad del fenómeno; no obstante, sería deseable que tuviera un mejor ajuste, lo que se lograría mediante la inclusión de otras variables significativas y el estudio de estos problemas desde múltiples ángulos, incluyendo factores que no se abarcaron en esta investigación.

Tras implementar el modelo y desestandarizar las variables correspondientes, se obtuvieron los resultados indicados en el Apéndice E.1, que en general, dados los objetivos de análisis se identificaron algunos aspectos relevantes.

Respecto a la tasa de mortalidad infantil en las localidades, en la figura 8 se detalla que estas son poco dispersas respecto a la tendencia global (situada alrededor de las 10.36 muertes por cada 1000 nacimientos), donde las áreas cuyo indicador es el más alto son Los Mártires (11.07) y Santa Fé (10.86), mientras que La Candelaria y Usaquén presentan los valores más bajos con 9.7 y 9.1 respectivamente. Llama la atención que Ciudad Bolívar, una de las localidades más vulnerables históricamente en la ciudad debido a la alta proporción de personas con necesidades insatisfechas y porcentajes más altos de pobreza multidimensional (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015) presente una tasa de mortalidad infantil bastante cercana al promedio global (10.22).

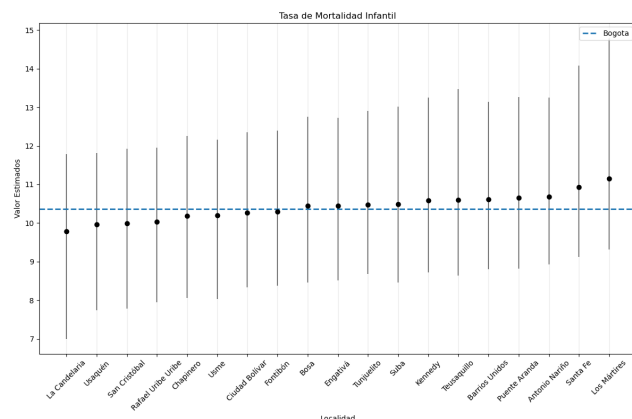


Fig. 8. Intervalos de Credibilidad para la TMI por localidad

Por otro lado, para la tasa de pobreza se obtuvo una razón de cambio β negativa que indica que por cada aumento porcentual en la pobreza se produce una disminución del 0.17% en la tasa de mortalidad infantil; en otras palabras, a mayor pobreza (teniendo en cuenta como se definió para este estudio) hay menos casos de defunciones de menores de 5 años. No obstante, en contraste con el resultado anterior, para el porcentaje de bebés con bajo peso al nacer se obtuvo un coeficiente de 0.3, señalando que por cada unidad de aumento en la variable, la tasa de mortalidad infantil también lo hace en un 300%, siendo de hecho, una de las variables con mayor poder predictivo para el modelamiento.

Adicionalmente, se identificó a través de la regresión jerárquica que la cantidad de madres que pertenecen al régimen subsidiado de salud tienen un efecto positivo en la TMI, tal que por cada aumento porcentual en la variable, la mortalidad infantil también aumenta en un 0.51%, contrario a los partos por cesárea, que a medida que aumenta este indicador, disminuye la variable objetivo.

Ahora bien, tal como las variables enunciadas previamente fueron significativas para el modelo, otras como la tasa de crecimiento poblacional, la tasa de fecundidad, la cantidad de muertes maternas, el número de madres sin régimen de aseguramiento en salud y la razón de prevalencia de sífilis apenas generaron efectos en la predicción dado que los intervalos creíbles de sus distribuciones posteriores pasaban por 0, lo cual brinda una idea general de aquellos factores relevantes en el modelo dado la forma como se definieron previamente.

7. Discusión

La mortalidad infantil en menores de 5 años en Bogotá entre 2012 y 2022 se presenta de distintas maneras, que son

influenciadas por factores como el bajo peso al nacer, el tipo de parto, la pobreza y el régimen de salud. En donde, al analizar el modelo y los resultados obtenidos, se identifican patrones importantes que ayudan a entender mejor estas variaciones y a visibilizar las problemáticas que enfrentan la población.

El análisis del modelo nombra que, a mayor número de partos por cesáreas realizadas, menor es la tasa de mortalidad infantil. Sin embargo, en el marco teórico señala lo contrario, donde se evidencia con mayor mortalidad. Esto se puede explicar por la justificación de los procedimientos. Por este motivo, MedlinePlus (s.f.), señala que, "Un parto por cesárea se realiza cuando no es posible o seguro para la madre dar a luz al bebé a través de la vagina." (par.2). En ese sentido, las cesáreas, al ser procedimientos mayormente en casos de riesgo, ya sea por la madre o el bebe, parecen tener un impacto positivo al reducir los peligros asociados con partos naturales complicados.

En consecuencia, el parto por cesárea permite prevenir complicaciones graves tanto para el bebé como para la madre, como recalca Sadler (2018) "Sin poner en duda que las cesáreas son intervenciones que salvan vidas de mujeres y recién nacidos cuando hay razones médicas que las justifiquen." (par.2). Su uso radica en una adecuada argumentación, ya que reduce riesgos en casos de peligro en un parto natural, no obstante, las diferencias con el marco teórico podrían deberse a cesáreas no justificadas médicamente, que aumentan complicaciones y mortalidad. Esto subraya la importancia de establecer criterios rigurosos para su realización.

El análisis confirma que el bajo peso al nacer está relacionado con una mayor mortalidad infantil, tal como señala González & Martínez (2022) "La prematuridad y el bajo peso extremo constituyen los principales determinantes relacionados con mortalidad en los neonatos de muy bajo peso." (par.5). Por ende, destaca la importancia de fortalecer los controles prenatales, asegurando un monitoreo riguroso del desarrollo fetal. Dado que "la causa más frecuente de tener un bajo peso de nacimiento es haber nacido antes de la fecha prevista (nacimiento prematuro)." (Stanford Children's Health, n.d.) por este motivo, es fundamental explorar cómo fortalecer o fomentar el acceso a servicios médicos para controles de embarazo.

De igual manera, se valida con respecto al régimen subsidiado, en donde se indica que la población perteneciente a este grupo tiene una mayor tasa de mortalidad infantil, como lo indica Romero (2017) "las madres de los niños menores de un año fallecidos tienen 1,4 veces más probabilidad de pertenecer al régimen subsidiado que las madres con hijos vivos" (p.58), por este motivo se deberá enmarcar

soluciones y análisis equivalentes para el acceso de la salud a las madres hacia los controles de embarazos en este determinado grupo, puesto que, hay una desigualdad a la hora del préstamo de los servicios en los diferentes regímenes, tal como señala Urrego (2022) “Una de las más grandes diferencias es que el régimen subsidiado recibe una cantidad de recursos mucho menor que el contributivo.” (par.1), de manera que, se deben estabilizar los recursos de las entidades hospitalarias para brindar una atención digna a todos los usuarios y no comprometa la salud de los infantes.

Con relación a la tasa de mortalidad infantil en Bogotá se observa de diferentes formas entre localidades, reflejando la influencia de factores sociales y económicos en este indicador. En Los Mártires, por ejemplo, se registra una de las tasas más altas, en donde se refleja un 85,3% de la población perteneciente al estrato 3 (Observatorio de Desarrollo Económico, Alcaldía de Bogotá, 2019). En el cual, se tendrá en cuenta el significado de ello, que según el DANE (s.f.), los estratos 1, 2 y 3 agrupan a los sectores con menores recursos económicos, beneficiarios de subsidios, esto en primera medida nos da a entender como las condiciones de vida afectan de manera significativa en las muertes de los infantes. Sin embargo, al observar localidades como Ciudad Bolívar, donde el 99,8% de la población pertenece a los estratos 1 y 2 (Cogua Vargas, 2013), la tasa de mortalidad se mantiene en el promedio, lo cual parece contradecir las tendencias según la contextualización teórica.

En contraste, Usaquén, conformada por estratos 4 y 6 (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006), presenta una de las tasas más bajas, reforzando la relación entre mejores condiciones económicas y menores tasas de mortalidad infantil. No obstante, la heterogeneidad socioeconómica de varias localidades dificulta analizar sus comportamientos de manera general, ya que, combinan diferentes estratos en su estructura. Por esta razón, es fundamental que estudios futuros consideren las particularidades de cada área y los factores contextuales específicos que pueden influir en los resultados en las muertes de los infantes. Este enfoque permitirá un análisis más preciso a las realidades de la población que afectan la vida de los niños en Bogotá.

Para tomar en consideración, la variable de pobreza se maneja de manera distinta contra la mortalidad infantil, puesto que, en el marco teórico se evidencia un aumento de la tasa de muertes de menores de edad a medida que se refleje factores superiores de escasez, pero el modelo muestra un patrón diferente, con tasas más bajas. Esta discrepancia señala que, se deben tener en cuenta más factores de estudio y manejo de los datos o características de ellos. Por este motivo, es recomendable profundizar el análisis con el fin de identificar posibles explicaciones detrás de estos hal-

lazgos y determinar de manera precisa como influyen los factores socioeconómicos en esta problemática.

8. Conclusión

En este trabajo de investigación se analizó la tasa de mortalidad infantil en menores de 5 años en Bogotá haciendo uso de un modelo jerárquico bayesiano para observar el comportamiento de los factores relacionados en las diferentes localidades de la ciudad lo que permitió identificar que las variables de mayor impacto en este indicador son el bajo peso al nacer de los infantes, la afiliación de las madres al régimen subsidiado de salud, los partos por cesárea y la tasa de pobreza económica.

Teniendo en cuenta el estudio en las distintas localidades, se identificaron diferencias significativas de la TMI entre ellas; por ejemplo, Los Mártires posee la peor tasa de mortalidad en comparación a Usaquén, cuyo valor para este indicador se ubica entre los mejores de la ciudad; además, se detalló que este comportamiento está asociado a múltiples factores demográficos y socioeconómicos que inciden en los resultados; no obstante, se encuentran discrepancias entre los resultados del modelo y los desarrollos teóricos en la literatura, por tal motivo, se recomienda la implementación de otros enfoques, estrategias y variables para una comprensión más detallada del fenómeno.

Por otro lado, se identificó que la relación entre la tasa de mortalidad infantil y la tasa de pobreza económica es más compleja de lo que se creía inicialmente, dado que los resultados del modelo señalaron una relación inversa entre estas dos variables que no está sustentada en ninguno de los desarrollos teóricos utilizados para la contextualización del problema; en esta medida, es necesario identificar los vacíos o dificultades presentes en la forma como se abordó en esta investigación las variables mencionadas.

Adicionalmente, con relación a los resultados de los partos por cesárea, se obtuvo que a mayores intervenciones de este tipo ocurren menos casos de muertes infantiles; lo que se puede sustentar teóricamente en que cuando se practican estos procedimientos con una justificación médica garantiza la protección a la integridad de vida de la madre y el hijo, contrario a los casos donde se realiza por decisión arbitraria, llegando a poner en riesgo la vida de ambos. De esta forma, sería interesante detallar el comportamiento de esta variables teniendo en cuenta el factor transversal de la justificación del procedimiento.

Finalmente, a través del modelo jerárquico bayesiano se identificó el comportamiento de la mortalidad infantil en las localidades de Bogotá bajo diversas variables, evaluando su importancia en el modelamiento de esta problemática alta-

mente compleja y cuya comprensión es de vital importancia para garantizar un sistema de salud más justo y equitativo. De igual manera, se recomienda profundizar en el análisis, dadas las limitaciones previamente expuestas. tiene menú contextual

9. Apéndices

9.1 Apéndice A: Fuentes de datos.

9.1.1 Apéndice A.1: Descripción de las fuentes de datos

Fuente	Nombre	Descripción
Datos Abiertos Bogotá	Mortalidad Infantil	Conjunto de datos que incluía la variable objetivo. Tiene 220 registros y no hay nulos.
Datos Abiertos Bogotá	Demografía, Pobreza y Gini	Conjunto que contiene la pobreza en Bogotá y sus localidades. Hay 6 columnas y contiene 379 registros.
Datos Abiertos Bogotá	Sífilis gestacional	Hay 6 columnas y contiene 374 registros.
Datos Abiertos Bogotá	Tasa global de fecundidad	Hay 7 columnas y tiene 419 registros.
Datos Abiertos Bogotá	Tasa mortalidad infantil	Hay 5 columnas y tiene 379 registros.
Datos Abiertos Bogotá	Tasa de mortalidad perinatal	Hay 5 columnas y tiene 331 registros.
Datos Abiertos Bogotá	Nacimientos según tipo y sitio del parto en Bogotá D.C.	Hay 6 columnas y contiene 57,767 registros.
Datos Abiertos Bogotá	Tasa específica de fecundidad de mujeres de 10 a 14 y 15 a 19 años en Bogotá D.C.	Hay 6 columnas y contiene 832 registros.
Datos Abiertos Bogotá	Proporción de bajo peso al nacer en Bogotá D.C.	Hay 6 columnas y tiene 254 registros.

9.1.2 Apéndice A.2: Descripción Variables

Variables	Descripción
Tasa global de fecundidad	Promedio de hijos que tendría una mujer durante su vida reproductiva.
Tasa de mortalidad infantil (< 5 años)	Número de muertes de niños menores de cinco años por cada 1,000 nacidos vivos
Porcentaje bajo peso al nacer	Porcentaje de nacidos vivos que pesaron menos de 2,500 gramos.
Muertes maternas	Número de muertes de mujeres durante el embarazo, parto o posparto.
Madres sin régimen de salud	Cantidad de madres sin afiliación a un sistema formal de seguridad social.
Razón de prevalencia de sífilis	Proporción de casos de sífilis detectados
Madres de régimen subsidiado	Número de madres con subsidios estatales para seguridad social.
Tasa de crecimiento poblacional	Tasa de la población de mujeres en edad fértil
Tasa de pobreza	Porcentaje de la población por debajo del umbral de pobreza
Partos por cesárea	Nacimientos realizados mediante cesárea
Año	Año de la recolección de los datos.
Área	Localidad de Bogotá a la cual pertenecen los datos.

9.1.3 Apéndice A.3: Estadísticas de las variables

Variables	Media	Desviación
Tasa global de fecundidad	1.39	0.36
Tasa de mortalidad infantil	11.06	4.32
Porcentaje bajo peso al nacer	13.37	1.77
Muertes maternas	1.43	1.76
Madres sin régimen de salud	335.40	351.09
Razón de prevalencia de sífilis	7.96	7.66
Madres de régimen subsidiado	880.90	933.54
Tasa de crecimiento poblacional	0.47	2.48
Tasa de pobreza	20.88	14.03
Partos por cesárea	1918.65	1702.85

9.2 Apéndice B: Prior.

9.2.1 Apéndice B.1: Distribución de las priors

Parámetros	Variable	Prior
β_0	Tasa de Mortalidad <5	$N(2, 20)$
β_1	Tasa de Fecundidad	$N(0, 20)$
β_2	Porcentaje de Bajo Peso al Nacer	$N(0, 20)$
β_3	Muertes Maternas	$N(0, 20)$
β_5	Madres sin R. de Salud	$N(0, 20)$
β_6	Razón Prevalencia de Sífilis	$N(0, 20)$
β_7	Madres R. Subsidiado	$N(0, 20)$
β_8	Tasa Crecimiento Poblacional	$N(0, 20)$
β_9	Tasa de Pobreza	$N(0, 20)$
β_{10}	Partos Cesárea	$N(0, 20)$
σ_y	Variabilidad dentro localidades	$HalfC(1)$
σ_μ	Variabilidad entre localidades	$HalfN(0,50)$

9.3 Apéndice C: HMC.

9.3.1 Apéndice C.1: algoritmo de HMC

Algorithm 1 Método HMC

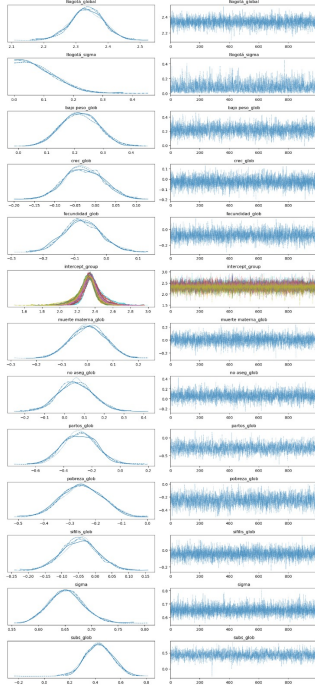
```

1: Dado  $X_0$  y  $\varepsilon$ , se define:
2:  $g_0 = \nabla U(X_0)$ 
3:  $E_0 = U(X_0)$ 
4:  $\varepsilon$ : tamaño de paso
5: for  $i = 1, \dots, n$  do
6:    $p = \text{random}$ 
7:    $H_0 = \frac{p^2}{2} + E_0$ 
8:    $X_i = X_{i-1}$ 
9:   for  $j = 1, \dots, m$  do
10:     $p = p - \varepsilon \cdot g_i$ 
11:     $X_i = X_i + \varepsilon \cdot p$ 
12:     $g_i = \nabla U(X_i)$ 
13:   end for
14:    $E_i = U(X_i)$ 
15:    $H_1 = \frac{p^2}{2} + E_i$ 
16:    $dH = H_1 - H_0$ 
17:   if  $dH < 0$  then
18:      $\text{accept} = 1$ 
19:   else
20:      $\text{accept} = 0$ 
21:   end if
22:   if  $\text{accept}$  then
23:      $g_0 = g_i$ ;  $X_0 = X_i$ ;  $E_0 = E_i$ 
24:   end if
25: end for

```

9.4 Apéndice D: Convergencia de los parámetros

9.4.1 Gráfico de la traza para todos los parámetros.



9.5 Apéndice E: Resultados.

9.5.1 Resultados generales del modelo.

	mean	sd	hdi_2.5%	hdi_97.5%	mcse_mean	mcse_sd	ess_bulk	ess_tail	r_hat
bogotá_global	10.360495	0.051000	2.238000	2.420000	0.001	0.001	4840.0	3273.0	1.0
bogotá_sigma	0.087000	0.064000	0.000000	0.198000	0.002	0.001	1422.0	2076.0	1.0
bajo_peso_glob	0.304192	0.090700	0.133956	0.473033	0.001	0.001	3518.0	3362.0	1.0
crec_glob	-0.071411	0.120660	-0.283181	0.164984	0.001	0.001	6542.0	3720.0	1.0
fecundidad_glob	-0.027394	0.021550	-0.067207	0.012784	0.001	0.001	3221.0	2755.0	1.0
intercept_group[0]	10.601548	0.098000	2.183000	2.562000	0.001	0.001	6526.0	2965.0	1.0
intercept_group[1]	10.559226	0.097000	2.179000	2.559000	0.001	0.001	6224.0	3397.0	1.0
intercept_group[2]	10.433273	0.097000	2.164000	2.543000	0.001	0.001	6926.0	3081.0	1.0
intercept_group[3]	10.155343	0.095000	2.129000	2.489000	0.001	0.001	5350.0	3112.0	1.0
intercept_group[4]	10.247154	0.098000	2.127000	2.520000	0.001	0.001	6185.0	3140.0	1.0
intercept_group[5]	10.412427	0.097000	2.154000	2.528000	0.001	0.001	6777.0	3294.0	1.0
intercept_group[6]	10.277942	0.093000	2.157000	2.513000	0.001	0.001	6755.0	3060.0	1.0
intercept_group[7]	10.538129	0.101000	2.176000	2.568000	0.001	0.001	5853.0	2855.0	1.0
intercept_group[8]	9.727919	0.129000	2.033000	2.495000	0.003	0.002	2549.0	2344.0	1.0
intercept_group[9]	11.056296	0.115000	2.230000	2.656000	0.002	0.001	3440.0	2538.0	1.0
intercept_group[10]	10.601548	0.098000	2.176000	2.555000	0.001	0.001	5856.0	3095.0	1.0
intercept_group[11]	9.984162	0.103000	2.095000	2.485000	0.002	0.001	4566.0	3457.0	1.0
intercept_group[12]	9.844305	0.108000	2.083000	2.479000	0.002	0.001	3962.0	3079.0	1.0
intercept_group[13]	10.837366	0.104000	2.185000	2.593000	0.002	0.001	5900.0	3091.0	1.0
intercept_group[14]	10.454160	0.103000	2.150000	2.556000	0.001	0.001	5933.0	3207.0	1.0
intercept_group[15]	10.559226	0.103000	2.163000	2.540000	0.002	0.001	5439.0	2861.0	1.0
intercept_group[16]	10.433273	0.095000	2.163000	2.534000	0.001	0.001	7158.0	3389.0	1.0
intercept_group[17]	9.924436	0.105000	2.098000	2.496000	0.001	0.001	5232.0	3357.0	1.0
intercept_group[18]	10.165504	0.096000	2.129000	2.495000	0.001	0.001	6071.0	3151.0	1.0
muerte materna_glob	0.007116	0.120968	-0.229483	0.217030	0.001	0.001	5000.0	3707.0	1.0
no_aseg_glob	20.397244	29.540837	-34.404310	75.962152	0.002	0.001	2790.0	3498.0	1.0
partos_glob	-482.839151	197.525107	-854.253883	-119.865963	0.003	0.002	2064.0	2673.0	1.0
pobresa_glob	-0.169824	0.054306	-0.287959	-0.064363	0.002	0.001	2398.0	2983.0	1.0
pfilia_glob	-0.049973	0.056636	-0.154261	0.059857	0.001	0.001	6563.0	2883.0	1.0
sigma	0.653000	0.033000	0.591000	0.715000	0.000	0.000	6136.0	3489.0	1.0
subs_glob	0.524806	0.128474	0.287249	0.769634	0.002	0.002	2443.0	2616.0	1.0

Referencias

- [1] Alkema, L., & Ling, W. (2011). *Estimating Under-Five Mortality Using Group-Based Trajectory Modeling*. *PLoS ONE*. <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0023954&type=printable>
- [2] Álvarez, H. (2017). *Mortalidad Infantil Bogotá: Un análisis de desigualdades*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/9aba674f-46e7-497a-9041-2fcc5d940883/content>
- [3] *Boletín Epidemiológico Semanal*. (2021). *Bajo peso al nacer; desnutrición aguda, moderada y severa y vigilancia integrada de la mortalidad por IRA, EDA y DNT*. https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/BoletinEpidemiologico/2021_Boletin_epidemiologico_semana_31.pdf
- [4] Camón, A. (2022). *Trabajo de fin de grado, Universidad de Zaragoza*. <https://zaguan.unizar.es/record/125093/files/TAZ-TFG-2022-3434.pdf>
- [5] *Caracterización general de escenarios de riesgo*. (2021). <https://www.idiger.gov.co/documents>
- [6] *Data for Impact [D4I]*. (s.f.). *Using Group-Based Trajectory and Prediction Modeling to Understand Under-Five Mortality*. <https://www.data4impactproject.org/es/news/using-group-based-trajectory-and-prediction-modeling-to-understand-under-five-mortality/>
- [7] Durán Strauch, E. (1999). *La problemática de salud de los niños y niñas colombianas*. *Revista de Salud Pública, 1*(2), 179–188. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-00641999000200179&lng=en&tlng=es
- [8] *Estadísticas vitales del DANE. Defunciones no fetales*. <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/EEVV/bol-EEVV-Nacimientos-IItrim2023.pdf>
- [9] Furzán, A. (2014). *Archivos Venezolanos de Puericultura y Pediatría*. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06492014000200006
- [10] Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., & Rubin, D. B. (2006). *Bayesian Data Analysis: Section on Hierarchical Models*. <http://www.stat.columbia.edu/~gelman/research/published/taumain.pdf>
- [11] *Gobernación del Valle del Cauca*. (2021). *Informe primer trimestre vigilancia de la mortalidad integrada menor de 5 años, periodo epidemiológico III, Valle del Cauca*. <https://www.valledelcauca.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=viewpdf&id=50997>
- [12] Herrera, A., & Merizalde, D. (2024). *Consecuencias de la malnutrición en la gestante y su hijo, una revisión narrativa*. <https://repository.ces.edu.co/handle/10946/6243?locale-attribute>
- [13] Johnson, A., Ott, M., & Dogucu, M. (2022). *Hierarchical Models Are Exciting*. *Modern Statistical Methods*. Taylor & Francis. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/mono/10.1201/9780429288340-15/hierarchical-models-exciting-alicia-johnson-miles-ott-mine-dogucu>
- [14] McElreath, R. (2020). *Statistical Rethinking: A Bayesian Course with Examples in R and STAN*. CRC Press.
- [15] Mejía, J., & Jiménez, J. (2017). *Determinantes de la mortalidad infantil en Colombia*. *Revista de Salud Pública, 20*(1), 3-9. <https://www.scielo.org/pdf/rsap/2018.v20n1/3-9>
- [16] Peña, C. (2019). *Más niños en Colombia están naciendo con bajo peso*. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/salud/bebes-con-bajo-al-nacer-peso-en-colombia-estudio-revela-cifras-363912>
- [17] Romero, C. (2017). *Factores asociados a la desigualdad de la Mortalidad Infantil en las localidades de Bogotá, 2013*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/78391/20532908.2017.pdf?sequence=1&isAllowed>

- [18] Rosa, D., Gómez, M., & Malca, W. (2014). *Mortalidad Fetal por Sífilis Congénita: Un Problema de Salud Pública Olvidado*. https://docs.bvsalud.org/biblioref/2020/03/1052071/rcm-v7-n3-2014_pag10-12.pdf
- [19] Salud data. (2024, agosto 23). *Tasa de Mortalidad Infantil en Bogotá D.C.* <https://saludata.saludcapital.gov.co/osb/indicadores/mortalidad-infantil/>
- [20] Stanford Medicine Children's Health. (s.f.). *Bajo peso de nacimiento*. <https://www.stanfordchildrens.org/es/topic/default?id=low-birth-weight-90-P05491>
- [21] Velázquez, N., Masud, J., & Avila, R. (2004). *Mortalidad infantil y desnutrición*. *Boletín Médico del Hospital Infantil de México*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-11462004000100010&script=sci_abstract