



Evaluación de métodos geoestadísticos a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de mapas de ruido en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA)

Ana Maria Melo Moreno

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesor

Libardo Antonio Londoño Ciro, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática

Medellín, Antioquia, Colombia

2025



Cita

(Melo Moreno, 2025)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Melo Moreno, A. M. (2025). *Evaluación de métodos geoestadísticos a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de mapas de ruido en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA)* [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática , Cohorte XX.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Tabla de contenido

Resumen	6
Abstract	7
1 Introducción	8
2 Objetivos	9
3 Marco teórico	10
4 Marco normativo	11
5 Metodología	12
6 Resultados	16
7 Conclusiones	31
Referencias	33



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Lista de tablas

Tabla 1. Resumen de los datos disponibles. Fuente elaboración propia	12
Tabla 2. Resumen análisis de estacionariedad. Fuente elaboración propia.....	14



Lista de figuras

Figura 1. Metodología de trabajo.	12
Figura 2. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo Gaussian para enero de 2025.	16
Figura 3. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo Gaussian para febrero de 2025.	18
Figura 4. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo Gaussian para marzo de 2025.	20
Figura 5. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo K-Bessel para abril de 2025.	22
Figura 6. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo Pentaesférico para mayo de 2025.	24
Figura 7. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo K-Bessel para junio de 2025.	26
Figura 8. Comportamiento espacio temporal del ruido de enero a junio de 2025.	29



Resumen

La contaminación acústica es una problemática creciente en entornos urbanos densamente poblados, donde el monitoreo y análisis espacial del ruido resulta esencial para una adecuada gestión territorial. Este estudio tiene como objetivo evaluar y comparar distintos métodos de interpolación geoestadística para la elaboración de mapas de ruido en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, utilizando como insumo datos proporcionados por el AMVA a través del SIATA y redes de ciencia ciudadana. La metodología se estructuró en ocho pasos principales que incluyeron: revisión bibliográfica, selección de métodos, recolección y análisis de datos, preparación de la información geográfica, modelamiento geoestadístico mediante Kriging, validación cruzada y comparación de desempeño. En este proceso se evaluaron diversos modelos de semivariograma —Spherical, Exponential, Gaussian, Tetraspherical, Pentaspherical, Hole Effect, Rational Quadratic, J-Bessel y K-Bessel— con el fin de identificar el comportamiento espacial más adecuado para los datos de ruido en cada periodo analizado. Los resultados permiten identificar las fortalezas y limitaciones de cada modelo de semivariograma y determinar cuáles presentan el mejor ajuste estadístico y espacial en un contexto urbano complejo como el Valle de Aburrá, aportando evidencia técnica para estudios futuros de ruido ambiental.

Palabras clave: Ruido, Métodos geoestadísticos, SIG, Mapas de Ruido.



Abstract

Noise pollution is a growing issue in densely populated urban environments, where spatial monitoring and analysis of noise levels are essential for effective territorial management. This study aims to evaluate and compare different geostatistical interpolation methods for the development of noise maps in the Metropolitan Area of the Aburrá Valley, using input data provided by the AMVA through SIATA and citizen-science monitoring networks. The methodology was structured into eight main steps, including a literature review, method selection, data collection and analysis, preparation of geographic information, geostatistical modeling using Kriging, cross-validation, and performance comparison. Several semivariogram models—Spherical, Exponential, Gaussian, Tetraspherical, Pentaspherical, Hole Effect, Rational Quadratic, J-Bessel, and K-Bessel—were assessed to identify the spatial behavior that best fits the noise data for each analyzed period. The results highlight the strengths and limitations of each semivariogram model and determine which ones offer the best statistical and spatial performance in a complex urban context such as the Aburrá Valley. This provides technical evidence to support future environmental noise studies.

Keywords: Noise, Geostatistical Methods, GIS, Noise Maps.



1 Introducción

La contaminación ambiental se refiere a la presencia de componentes nocivos en el ambiente, los cuales afectan la salud humana y los ecosistemas. Esta puede ser de naturaleza biológica, química o física, y se clasifica en diversas categorías como la contaminación atmosférica, del suelo, hídrica, acústica, visual y térmica, la mayoría como consecuencia de actividades antrópicas.

En los últimos años, la contaminación acústica ha ganado relevancia dentro del estudio ambiental, ya que históricamente se ha priorizado la atención en otros tipos de contaminación debido a sus impactos más visibles o inmediatos. Sin embargo, se ha venido reconociendo que el ruido ambiental también representa un riesgo significativo para la calidad de vida.

El ruido ambiental se define como la sumatoria de todas las fuentes emisoras de sonido presente en entornos urbanos (Secretaría Distrital de Ambiente, s.f.). Estas fuentes se clasifican en fijas, como aquellas provenientes de actividades económicas (industria, comercio, servicios), y móviles, como las asociadas al flujo vehicular, aéreo y ferroviario.

En Colombia, la Resolución 0627 de 2006 establece la norma nacional para la emisión de ruido y ruido ambiental. Esta normativa define los criterios para la medición del ruido, los límites permisibles y establece la responsabilidad de las autoridades ambientales para elaborar y actualizar mapas de ruido en municipios con más de 100.000 habitantes, cada cuatro años (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006).

En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como conjunto de herramientas de representación cartográfica que permiten gestionar, analizar y representar datos geoespaciales, se convierten en un recurso clave para el abordaje técnico de la contaminación acústica. A través de estas plataformas es posible aplicar distintos métodos geoestadísticos que permiten interpolar y visualizar los niveles de ruido, facilitando así la elaboración de mapas de ruido. En este trabajo, se emplea la plataforma ArcGIS como herramienta principal para llevar a cabo este proceso.



2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la aplicación de herramientas SIG para la elaboración de mapas de ruido en el AMVA, mediante la aplicación y comparación de distintos métodos de interpolación geoestadística.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar que métodos geoestadísticos disponibles en ArcGIS Pro que resultan adecuados para representar espacialmente los niveles de ruido.
- Aplicar diferentes métodos de interpolación disponibles en ArcGIS Pro para generar mapas de ruido en el AMVA.
- Comparar los métodos aplicados en contextos urbanos con características topográficas complejas para evaluar el comportamiento, ventajas y limitaciones de cada uno de ellos.



3 Marco teórico

El ruido se define como cualquier sonido no deseado que puede resultar molesto. Cuando su intensidad o persistencia genera afectaciones en la salud y el bienestar humano, se considera contaminación acústica. A diferencia de otros contaminantes, el ruido no deja residuos visibles ni se acumula en el medio ambiente, pero sus efectos pueden ser igual de perjudiciales. Además, posee un carácter de percepción, lo cual complejiza su evaluación, ya que no solo depende de su intensidad, sino también de otros factores como la frecuencia, el tiempo de exposición y el contexto en el que se presenta (Área Metropolitana del Valle de Aburrá [AMVA], s.f.).

Dado su impacto en la salud pública y la calidad de vida, el análisis del ruido requiere una aproximación metódica con marcos normativos e instrumentos técnicos, como los Mapas Estratégicos de Ruido (MER), los cuales permiten visualizar espacialmente la distribución de los niveles sonoros.

El desarrollo de estos mapas, cuando se basa en herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y en métodos de interpolación geoestadística, proporciona una representación más precisa y útil para la gestión territorial. Dentro de estas técnicas se encuentran métodos como el Kriging, que ofrecen distintos niveles de precisión según las características del fenómeno y del territorio.

En contextos complejos como el Valle de Aburrá, donde la topografía juega un papel determinante en la propagación del sonido, resulta crucial evaluar y comparar el desempeño de estas técnicas para seleccionar las más adecuadas. Esta comparación permite identificar las metodologías más adecuadas para la elaboración de mapas de ruido, contribuyendo a una mejor comprensión del entorno acústico y la toma de decisiones informadas en cuanto a la planificación territorial.



4 Marco normativo

En Colombia, el manejo del ruido ambiental se encuentra regulado por diferentes disposiciones normativas orientadas tanto a su medición como a su control:

Resolución 627 de 2006: establece la norma nacional para la emisión de ruido y ruido ambiental. Define los límites permisibles de presión sonora para diferentes zonas y horarios, y establece la obligación de elaborar y actualizar mapas de ruido en los municipios con más de 100.000 habitantes cada cuatro años (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006).

Ley 99 de 1993: crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Designa a las corporaciones autónomas regionales y otras autoridades ambientales como responsables del control de emisiones contaminantes, incluyendo el ruido (Congreso de Colombia, 1993).

Resolución 8321 de 1983: dicta normas sobre la protección y conservación de la audición en ambientes laborales, estableciendo límites máximos permisibles de exposición al ruido (Ministerio de Salud, 1983).

A nivel internacional, se han establecido diversas estrategias para gestionar el ruido ambiental. Una de las más reconocidas es la Directiva 2002/49/CE de la Unión Europea, que obliga a los Estados miembros a elaborar Mapas Estratégicos de Ruido (MER) y Planes de Acción cada cinco años en aglomeraciones urbanas, ejes viales, ferroviarios y aeroportuarios (Unión Europea, 2002). Estos mapas permiten identificar zonas con alta exposición al ruido y diseñar políticas de mitigación.

La Organización Mundial de la Salud ha desarrollado Guías de Ruido Ambiental con recomendaciones sobre niveles máximos de exposición para evitar efectos adversos, considerando distintas fuentes como carreteras, ferrocarriles, tráfico aéreo e industrial (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2018).



5 Metodología

En la Tabla 1 se muestra el resumen de los datos disponibles. Se recibieron dos fuentes principales de información proporcionadas por el AMVA:

- Red oficial de estaciones: 14 estaciones de monitoreo de ruido, con código, nombre, municipio, latitud y longitud. Los registros incluyen niveles horarios diurnos y nocturnos entre enero y junio de 2025.
- Red de ciudadanos científicos: archivo histórico con múltiples series de datos de ruido.

Fuente	Nº Estaciones	Periodo disponible	Estado de información
Red oficial (SIATA)	14	Enero – Junio 2025	Completa (con coordenadas)
Red ciudadanos científicos	N/D	Enero – Junio 2025	Incompleta (sin coordenadas)

Tabla 1. Resumen de los datos disponibles. Fuente elaboración propia

La metodología implementada para la elaboración de los mapas de ruido en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá se estructuró en dos grandes componentes que a su vez se distribuyeron en otros componentes

1. Revisión conceptual y selección de métodos
2. Geoprocesamiento e implementación de los modelos de interpolación en ArcGIS Pro.

Esta estructura permitió integrar fundamentos teóricos, prácticas recomendadas y análisis espacial robusto para garantizar la consistencia en el tratamiento de los datos y la elección del modelo óptimo. En la Figura 1. Se muestra el proceso metodológico.



Figura 1. Metodología de trabajo.

El proceso inició con una revisión bibliográfica sistemática en las bases de datos ScienceDirect y Scopus, con el propósito de identificar los métodos geoestadísticos más empleados para la elaboración de mapas de ruido en contextos urbanos y topográficamente complejos. Para ello se utilizaron búsquedas avanzadas con palabras clave como noise mapping, geostatistics, kriging, interpolation methods, urban noise, combinadas mediante operadores booleanos. Asimismo, se aplicaron filtros por año de publicación, disciplinas afines y artículos revisados por pares.

Se descargaron inicialmente los artículos cuyo título, resumen o palabras clave mostraban afinidad temática con los objetivos de este estudio. Posteriormente, se aplicó una segunda fase de cribado, consistente en una lectura detallada para evaluar si el contenido abordaba metodologías aplicables al análisis espacial del ruido y a técnicas de interpolación disponibles en ArcGIS Pro.

Del análisis de estos documentos se identificaron los métodos más empleados en estudios con condiciones similares a las del Valle de Aburrá, tales como Kriging, CoKriging y IDW. Este diagnóstico permitió establecer una línea base sobre algunos métodos que podían ser evaluados.

Para el desarrollo práctico, se solicitaron datos de ruido ambiental al Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), provenientes del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) y de la red de ciencia ciudadana.

Los datos de la red oficial incluyen 14 estaciones distribuidas en el territorio metropolitano, con mediciones horarias diurnas y nocturnas entre enero y junio de 2025, e información completa de coordenadas geográficas. En contraste, la red de ciencia ciudadana dispone de un historial extenso de registros, pero sin georreferenciación, lo cual impide su uso directo en procesos de interpolación espacial.

Tras la recepción de los datos, se realizó un proceso de verificación y limpieza, que incluyó:

- Revisión de datos faltantes o inconsistentes.
- Confirmación y estandarización del sistema de coordenadas.
- Evaluación de la distribución espacial y temporal de los registros.
- Selección de los valores representativos para cada mes analizado.

Antes de aplicar los métodos geoestadísticos, se llevó a cabo un análisis exploratorio de datos orientado a verificar la Estacionariedad de los datos del ruido. Este análisis incluyó:



- Análisis de Estacionariedad de los datos por mes.
- Análisis de valores atípicos.

Esta etapa fue fundamental para reconocer patrones y determinar la adecuada aplicabilidad de los modelos de interpolación.

El resultado del análisis de Estacionariedad mes se muestra en la Tabla 2.

Mes	Coefficiente de Sesgo	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Enero	0,570873	58,31326	8,61588	14,78
Febrero	0,46612	58,50798	7,839304	13,4
Marzo	0,45723	58,49485	9,609864	16,43
Abril	0,525905	59,64636	9,327785	15,64
Mayo	0,59936	59,76246	9,188353	15,37
Junio	0,356072	59,98693	9,205422	15,35

Tabla 2. Resumen análisis de estacionariedad. Fuente elaboración propia

De la tabla 2 se puede inferir que en general los datos de ruido son estacionarios y por tanto se pueden aplicar los métodos geoestadísticos para representar el patrón espacio-temporal del ruido en el área de estudio.

El geoprocetamiento se ejecutó en ArcGIS Pro, empleando la herramienta especializada Geoestatistical Wizard, que permite parametrizar, ejecutar y evaluar diferentes métodos de interpolación, además de generar reportes técnicos estandarizados.

El método seleccionado y aplicado fue el kriging Ordinario incluyendo análisis de desempeño de diferentes modelos variográficos como el esférico, exponencial, Gaussian, tetraesferico, pentaesferico, hole effect, rational quadratic, J-Bessel y K-Bessel.

Para determinar el método de interpolación con mejor desempeño, se empleó la técnica de validación cruzada integrada en el Geoestatistical Wizard. La validación cruzada usa diferentes estadísticos de robustos de error como:

- RMS (Root Mean Square)
- RMSS (Root Mean Square Standardized)
- ASE (Average Standard Error)

Con base en los resultados de la validación cruzada, se seleccionó para cada mes el modelo con mejor desempeño. En la mayoría de los casos, los modelos Gaussian y K-Bessel obtuvieron



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

los mejores desempeños, debido a su capacidad para modelar fenómenos continuos con dependencia espacial moderada. Como productos del proceso metodológico se generaron mapas mensuales de ruido para los meses de enero a junio.



6 Resultados

En la distribución espacial de los puntos de medición de ruido, se puede observar una alta densidad de muestreo en el centro y sur del valle de Aburrá (Medellín, Itagui, Envigado, Sabaneta), cobertura media en municipios como Bello y Copacabana y cobertura baja o casi nula en zonas periféricas del norte (Girardota y Barbosa) y suroccidente. Esto influye directamente en la forma de los mapas interpolados ya que las áreas con mayor densidad de datos generan superficies mas suaves y confiables, mientras que las zonas con menor densidad de datos se generan patrones espaciales con mayor incertidumbre. En las figuras 2 – 7 se muestran los resultados obtenidos.

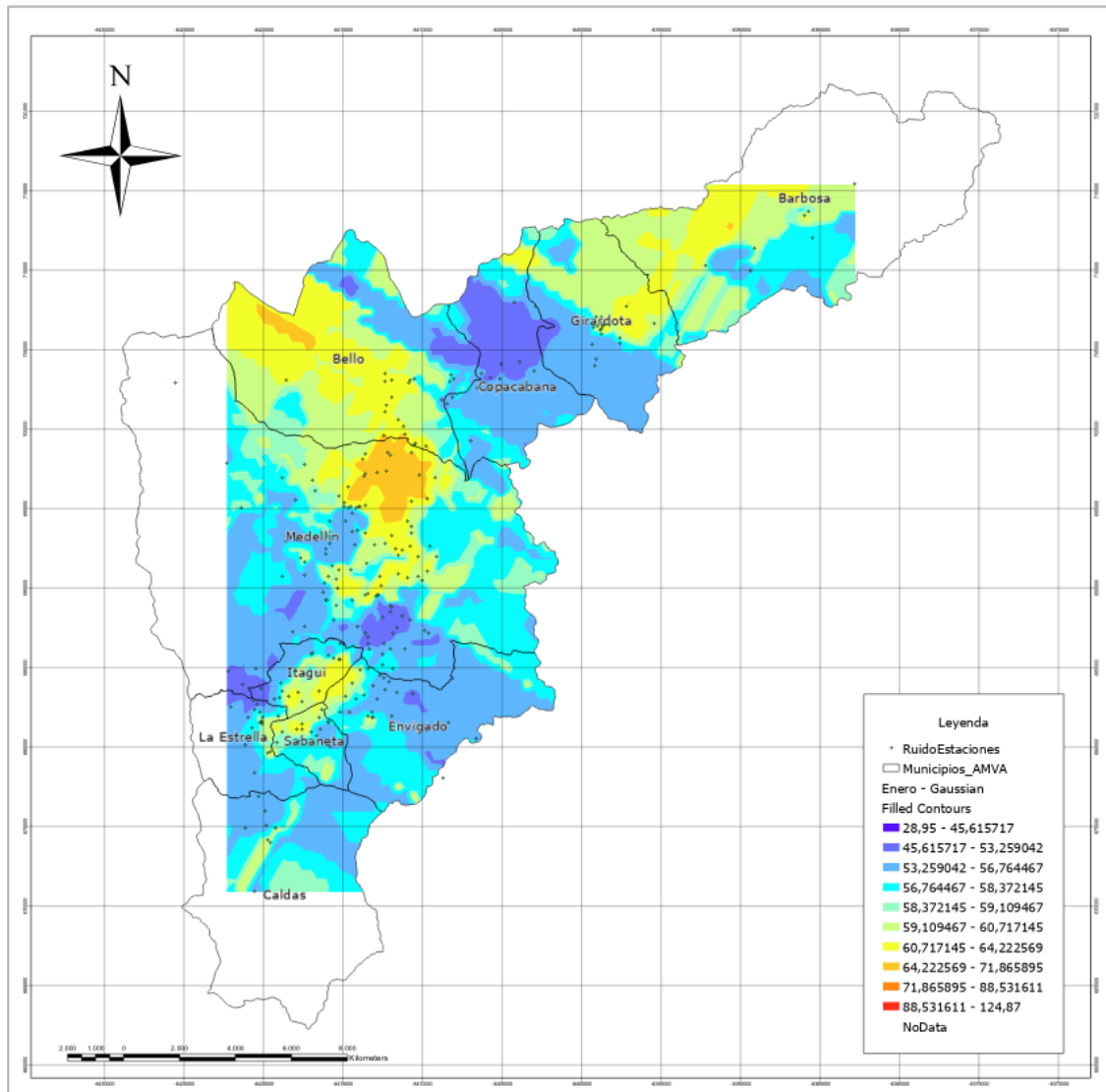


Figura 2. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo Gaussiano para enero de 2025.

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento espacial del ruido para el mes de enero. El modelo Gaussian presentó el mejor desempeño según la validación cruzada, con un valor de la raíz del error cuadrático promedio estandarizado (RMSS) de 99,5%.

La superficie interpolada muestra una mayor concentración de niveles de ruido al noroccidente del Valle de Aburra, especialmente en sectores de Medellín, Bello y Barbosa, con valores entre 61 y 64 dB. Estas áreas presentan mayor densidad poblacional y actividad vehicular, lo cual está relacionado con la elevación de los niveles registrados. En contraste, gran parte de la zona central y sur del valle muestran niveles más moderados, con valores que oscilan entre 29 y 57 dB, mostrando una menor intensidad de fuentes fijas y móviles.

Con base en la resolución 627 de 2006, los valores obtenidos se encuentran por debajo del umbral establecido de 75 dB para zonas industriales y 65 dB para zonas residenciales durante el periodo diurno. Por tanto, se concluye que para este mes no se evidencia superación de los niveles máximos permisibles en ninguna zona del área de interés.

En consecuencia, este comportamiento es coherente con el contexto temporal del mes, en el cual las actividades humanas, como lo son las laborales, industriales y comerciales, tienden a disminuir debido al periodo de vacaciones lo cual contribuye a una reducción general de las fuentes generadoras de ruido ambiental, especialmente en las zonas urbanas.

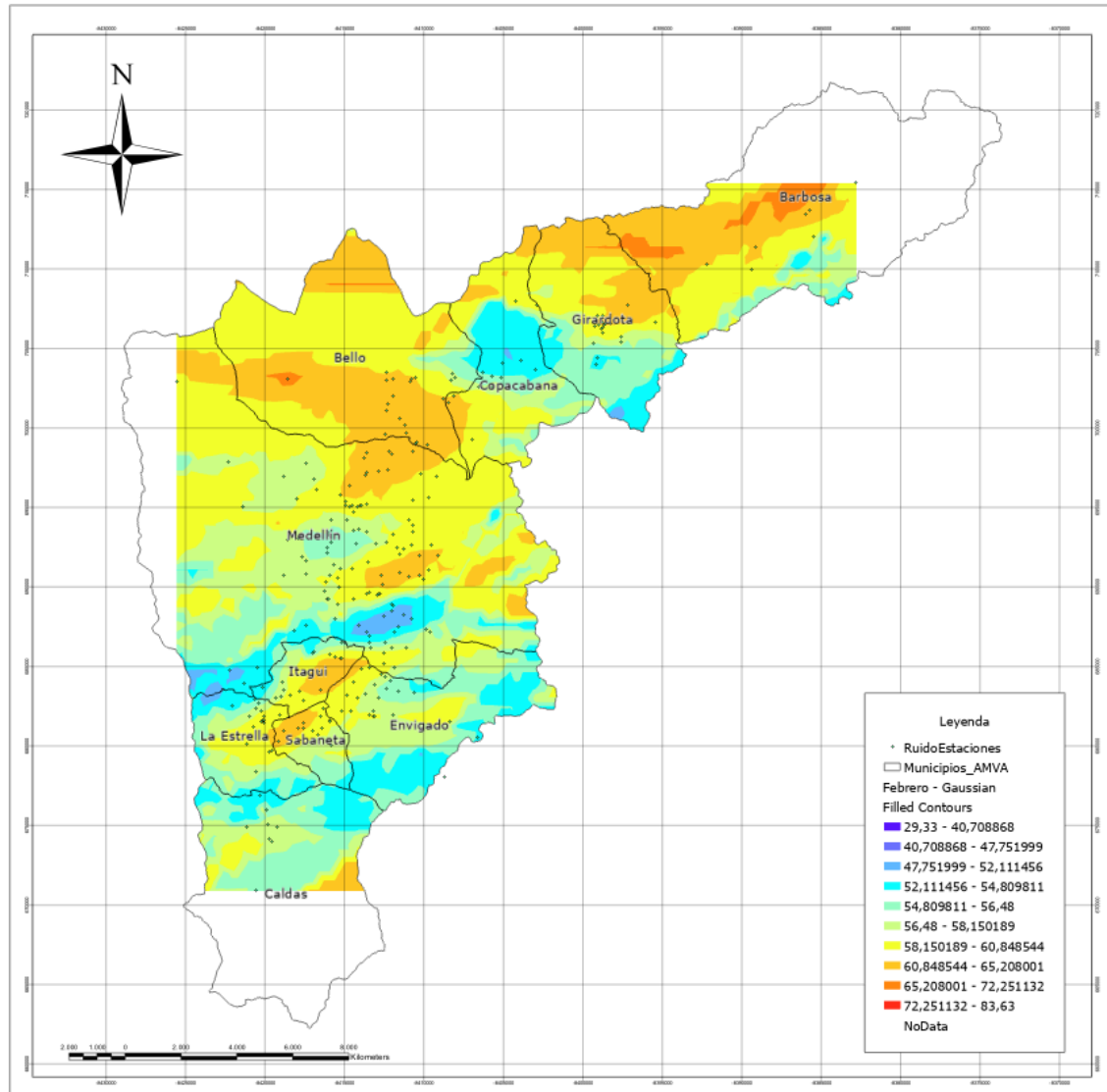


Figura 3. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo Gaussian para febrero de 2025.

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 3 se muestra el comportamiento espacial del ruido para el mes de febrero. El modelo Gaussian volvió a presentar el mejor ajuste según la validación cruzada con un valor de la raíz del error cuadrático promedio estandarizado (RMSS) de 98,3%.

La superficie interpolada muestra un incremento generalizado en los niveles de ruido respecto a enero, particularmente en los sectores norte y noroccidente del valle, incluyendo áreas de Medellín, Bello, Copacabana y Barbosa. En estas zonas se registran valores predominantes entre 58 y 67 dB, reflejando una mayor intensidad asociada al reinicio de actividades urbanas,



comerciales y vehiculares tras el retorno de la población a sus rutinas habituales. No obstante, se identifican núcleos puntuales con valores superiores, próximos a los 69–71 dB en Bello y Barbosa.

Aunque estos valores representan incrementos notables respecto al mes anterior, aún se encuentran dentro de los límites establecidos por la Resolución 627 de 2006, que fija umbrales máximos de 75 dB para zonas industriales y 65 dB para zonas residenciales en periodo diurno. No obstante, algunas áreas residenciales alcanzan valores cercanos al límite permitido, lo cual sugiere la necesidad de un monitoreo más detallado para futuras evaluaciones.

En contraste, las zonas del centro y sur del valle muestran niveles moderados de ruido, con valores que oscilan entre 38 y 58 dB, reflejando menor nivel de ruido y una distribución más homogénea.

En consecuencia, la distribución espacial del ruido en febrero evidencia un aumento significativo del ruido ambiental frente al mes anterior, coherente con la reactivación laboral, académica y comercial que caracteriza el inicio del año. Aunque no se presentan superaciones de los valores máximos permisibles según la normatividad vigente, los niveles elevados en zonas residenciales de alta densidad constituyen un aspecto relevante para la gestión del ruido urbano en el AMVA.

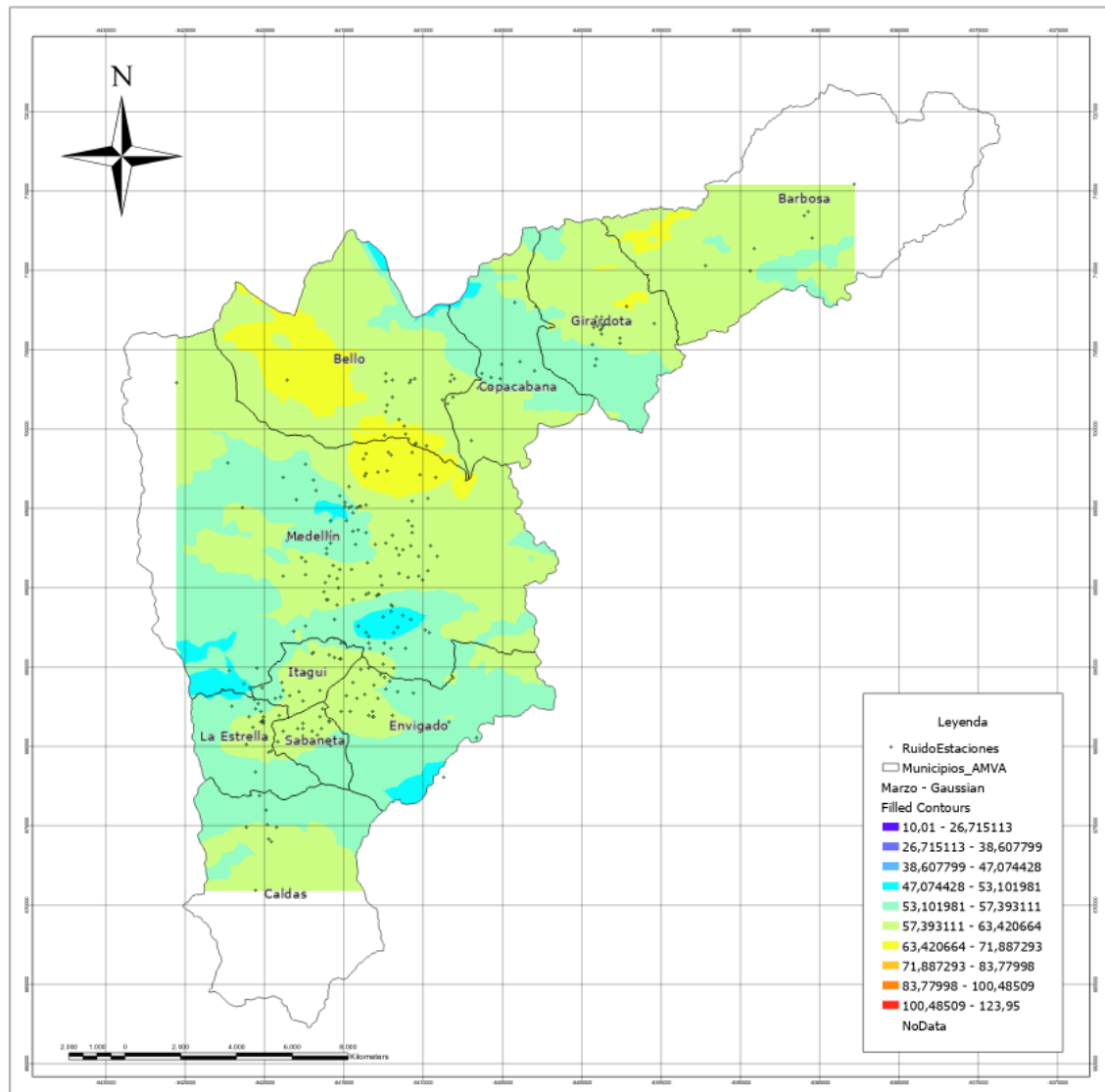


Figura 4. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo Gaussian para marzo de 2025.

Fuente. *Elaboración propia.*

En la Figura 4 se muestra el comportamiento espacial del ruido para el mes de marzo. El modelo Gaussian fue nuevamente el que presentó el mejor ajuste según la validación cruzada con un valor de la raíz del error cuadrático promedio estandarizado (RMSS) de 99,8 %.

La superficie interpolada durante marzo muestra una disminución generalizada en los niveles de ruido respecto a febrero, con una superficie interpolada más homogénea con valores entre 50 y 62 dB en la mayor parte del territorio. Este patrón indica un comportamiento acústico moderado, especialmente en zonas del centro y sur del valle, donde los niveles registran menor

variabilidad y se mantienen dentro de rangos considerados bajos para un entorno urbano de alta densidad.

En las zonas del norte del valle, como el noroccidente de Medellín, Bello, Girardota y Barbosa, se identifican incrementos puntuales con valores entre 63 y 71 dB, aunque en menor extensión espacial comparado con los meses previos. Estos aumentos suelen corresponder a corredores viales principales y áreas de interacción urbana, donde la movilidad y las actividades comerciales generan mayores aportes de ruido.

A pesar de estas áreas con valores relativamente más altos, los niveles de ruido estimados en marzo permanecen por debajo de los umbrales establecidos por la Resolución 627 de 2006, que define límites máximos de 65 dB para zonas residenciales y 75 dB para zonas industriales en el periodo diurno. La totalidad del valle se encuentra dentro de los rangos permitidos, lo que indica la ausencia de contaminación acústica durante este mes según la normatividad nacional.

En consecuencia, la distribución de ruido en marzo sugiere un comportamiento más atenuado y estable, posiblemente asociado a variaciones en el flujo vehicular o disminución de actividades con altos niveles de ruido. Este mes representa uno de los periodos con menor intensidad de ruido dentro del primer trimestre analizado.

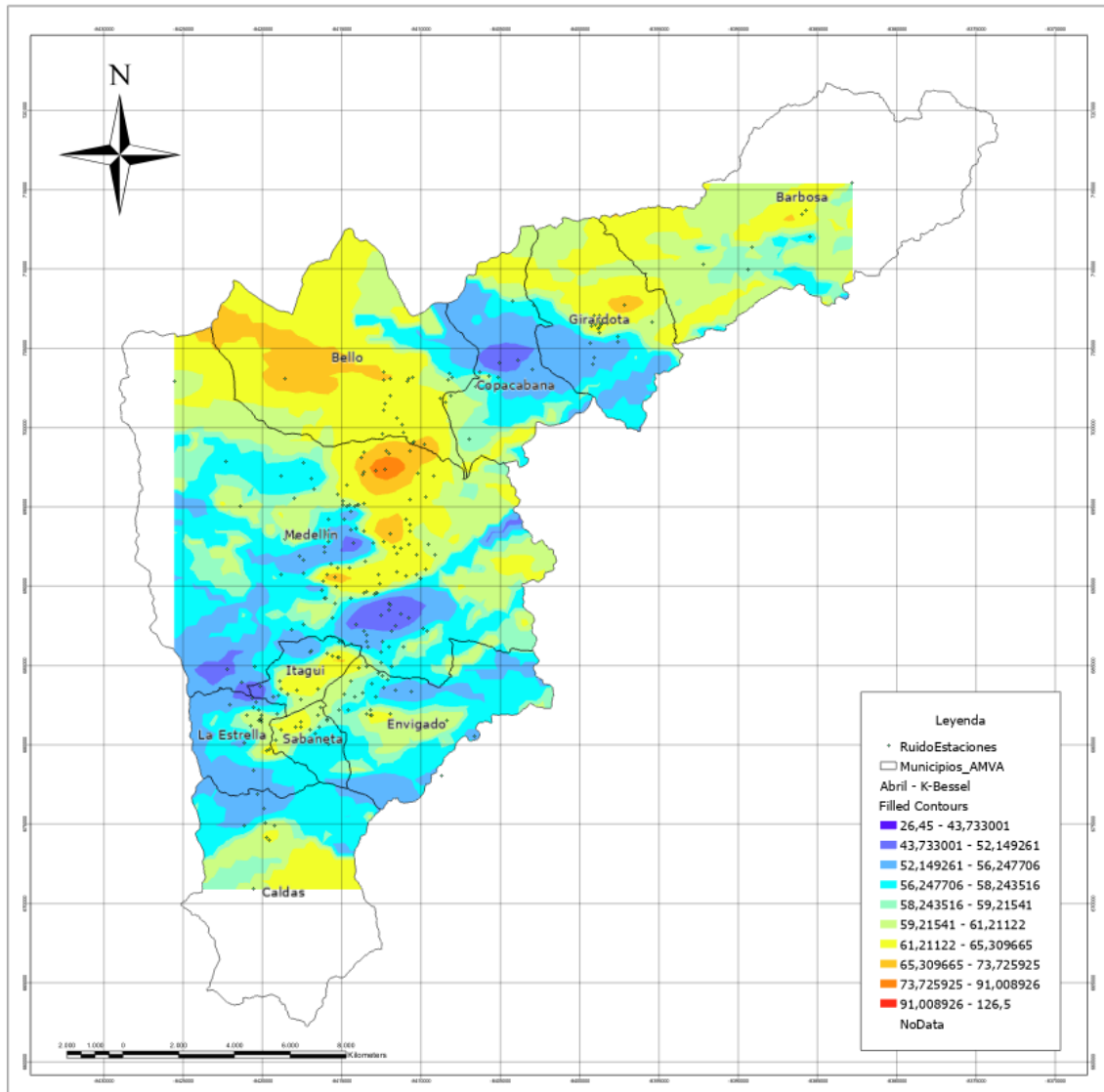


Figura 5. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo K-Bessel para abril de 2025.

Fuente. *Elaboración propia.*

En la Figura 5 se muestra el comportamiento espacial del ruido para abril. El modelo K-Bessel fue el que presentó el mejor desempeño de acuerdo con los resultados de la validación cruzada con un valor de la raíz del error cuadrático promedio estandarizado (RMSS) de 101,7 %.

Durante abril la superficie interpolada evidencia menor heterogeneidad espacial en los niveles de ruido respecto a marzo, con valores que oscilan principalmente entre 50 y 60 dB, pero con concentraciones más marcadas en zonas específicas. Se observan mayores niveles de ruido en la región noroccidental del valle, especialmente en sectores del centro y el noroccidente de



Medellín, en Bello, Copacabana y en menor medida en Girardota, en donde se observan áreas con niveles entre 61 y 72 dB, asociadas a corredores viales urbanos, zonas mixtas y áreas con mayor densidad de actividades humanas. Asimismo, en el centro del valle, hacia Medellín y Envigado, se destacan pequeñas zonas con incrementos puntuales que alcanzan valores cercanos a los 58 y 62 dB. En contraste, la parte sur del valle, correspondiente a los municipios de Itagüí, Sabaneta y La Estrella, muestra niveles más bajos, con valores que oscilan entre 52 y 59 dB, evidenciando un comportamiento acústico más atenuado y menos ruido.

A pesar de que haya zonas donde los niveles son relativamente altos, los valores estimados permanecen dentro de los límites establecidos por la Resolución 627 de 2006, que fija máximos de 65 dB para zonas residenciales y 75 dB para zonas industriales en el periodo diurno. En consecuencia, el comportamiento acústico de abril no representa un escenario de contaminación por ruido según la normativa, aunque sí evidencia focos de mayor presión sonora que deben considerarse en procesos de planeación territorial y monitoreo continuo.

En consecuencia, abril muestra un aumento moderado en la variabilidad espacial del ruido en comparación con los meses anteriores, con presencia de zonas diferenciadas de mayor incidencia de ruido. Este comportamiento puede relacionarse con la reactivación gradual de actividades urbanas y con patrones estacionales propios del segundo trimestre del año.

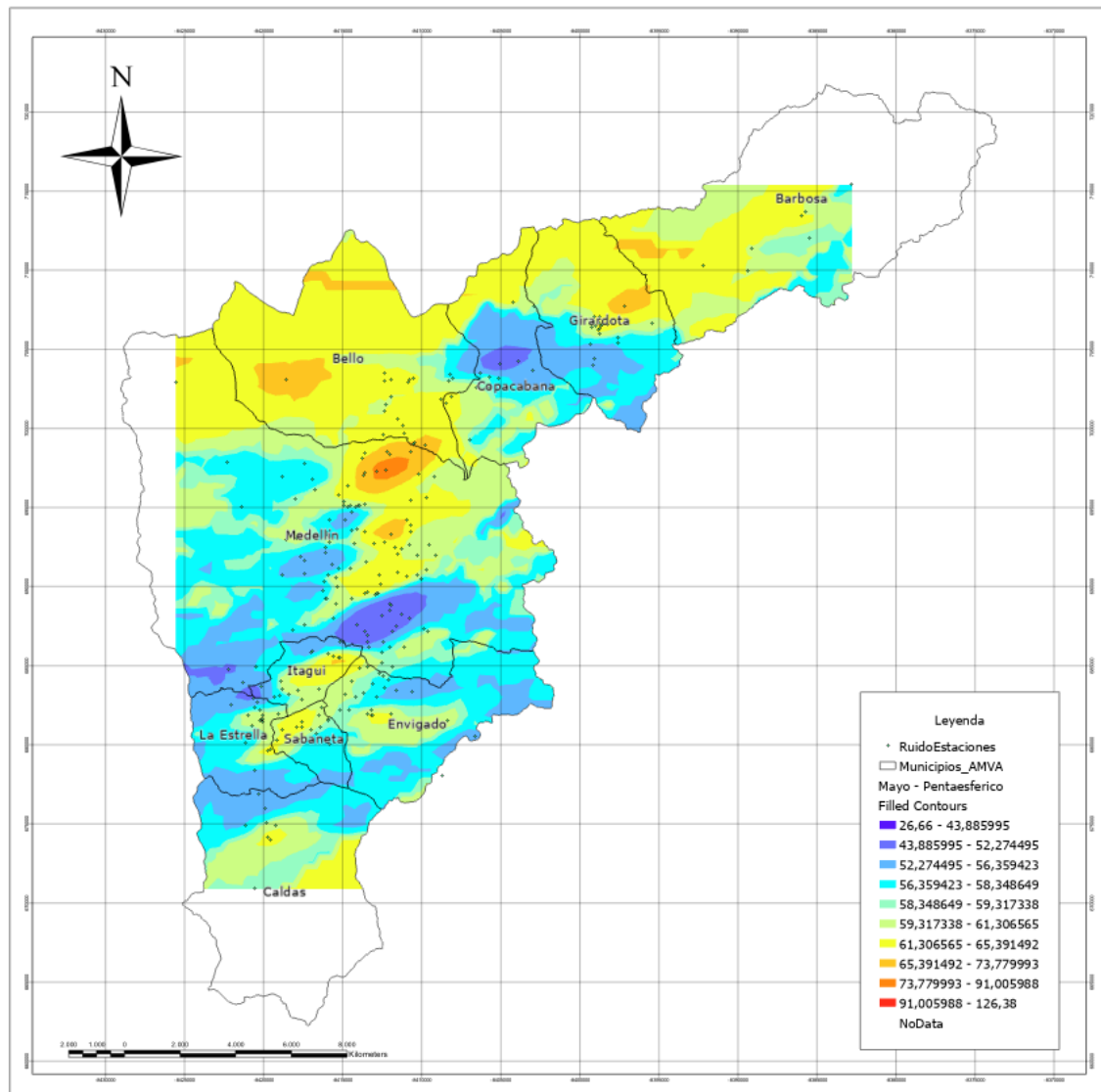


Figura 6. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo Pentaesférico para mayo de 2025.

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 6 se muestra el comportamiento espacial del ruido para el mes de mayo. El modelo pentaesférico presentó el mejor desempeño según los resultados de la validación cruzada con un valor de la raíz del error cuadrático promedio estandarizado (RMSS) de 102,1 %.

La superficie interpolada revela mayores niveles de ruido, aunque un comportamiento similar al mes de abril. En la zona noroccidental del valle, que incluye municipios como Bello, Copacabana y Girardota, se identifican áreas con niveles entre 61 y 71 dB, en el centro del valle, especialmente en sectores de Medellín, Itagüí y Envigado, se observan áreas que oscilan entre 58



y 65 dB, lo cual sugiere una dinámica urbana activa, pero con variabilidad influenciada por cambios en la densidad poblacional.

Para este mes en términos normativos, los niveles registrados para mayo continúan ubicándose dentro de los límites establecidos por la Resolución 627 de 2006, que establece valores máximos permisibles de 65 dB para zonas residenciales y 75 dB para zonas industriales en el periodo diurno. Aunque se identifican zonas con niveles cercanos al límite residencial, ninguna supera los valores regulados para las áreas urbanas en horario diurno, por lo que el comportamiento del fenómeno no representa un escenario de contaminación según la normativa vigente.

En consecuencia, mayo se caracteriza por una mayor variabilidad espacial respecto a meses anteriores, con zonas de transición más pronunciadas y una distribución del ruido más contrastada entre el norte y el sur del área de estudio.

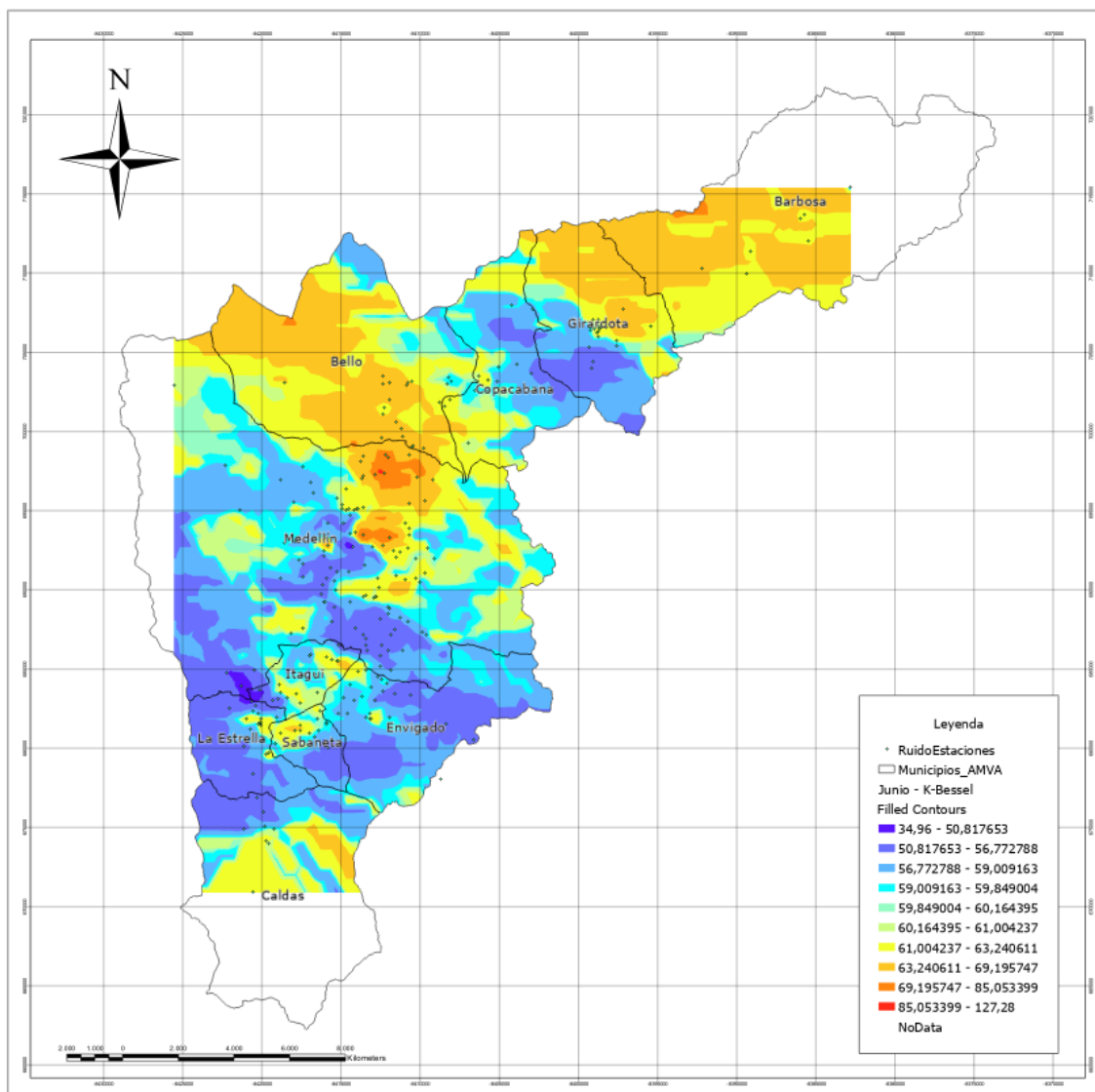


Figura 7. Patrón Espacial del Ruido mediante un Modelo K-Bessel para junio de 2025.

Fuente. *Elaboración propia.*

En la Figura 7 se muestra el comportamiento espacial del ruido para junio. El modelo K-Bessel fue el que presentó el mejor desempeño como resultado de la validación cruzada con un valor de la raíz del error cuadrático promedio estandarizado (RMSS) de 112 %.

La superficie interpolada para junio refleja una disminución notable de los niveles de ruido en la zona sur y suroriental del valle, mientras que se observa un incremento importante en la zona norte y noroccidental. Este comportamiento genera un patrón de contraste más definido que en meses anteriores.



En el sur del Valle de Aburrá incluyendo Envigado, Itagüí, Sabaneta y La Estrella, así como la zona suroriental de Medellín, se observan valores que oscilan entre 43 y 56 dB, se evidencia una disminución considerable del ruido. Esta disminución puede obedecer a una menor carga de movilidad en este periodo por ser de nuevo un periodo de vacaciones en donde hay mayor predominancia de usos residenciales.

En contraste, la zona noroccidental del valle, que abarca la parte noroccidental de Medellín, así como los municipios de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa, presenta un incremento significativo en los niveles de ruido, con valores que oscilan entre 61 y 74 dB. Esta intensificación del ruido puede asociarse a alta congestión vehicular, áreas con mayor actividad económica o expansiones industriales o comerciales.

A pesar de que haya zonas donde los niveles son relativamente altos, los valores estimados continúan cumpliendo los límites establecidos por la Resolución 627 de 2006, que define máximos permisibles de 65 dB para áreas residenciales en el periodo diurno y 75 dB para zonas industriales. Aunque se identifican sectores con valores cercanos al límite residencial en el norte del valle, ninguno supera los niveles regulados, por lo que el comportamiento acústico sigue sin representar un escenario de contaminación según la norma.

En consecuencia, junio se caracteriza por un patrón de contraste más marcado en comparación con meses anteriores, con zonas de ruido reducido en el sur del valle y una intensificación clara en el norte. Este comportamiento refleja cambios significativos en la dinámica urbana, la movilidad y posiblemente la actividad industrial y comercial.

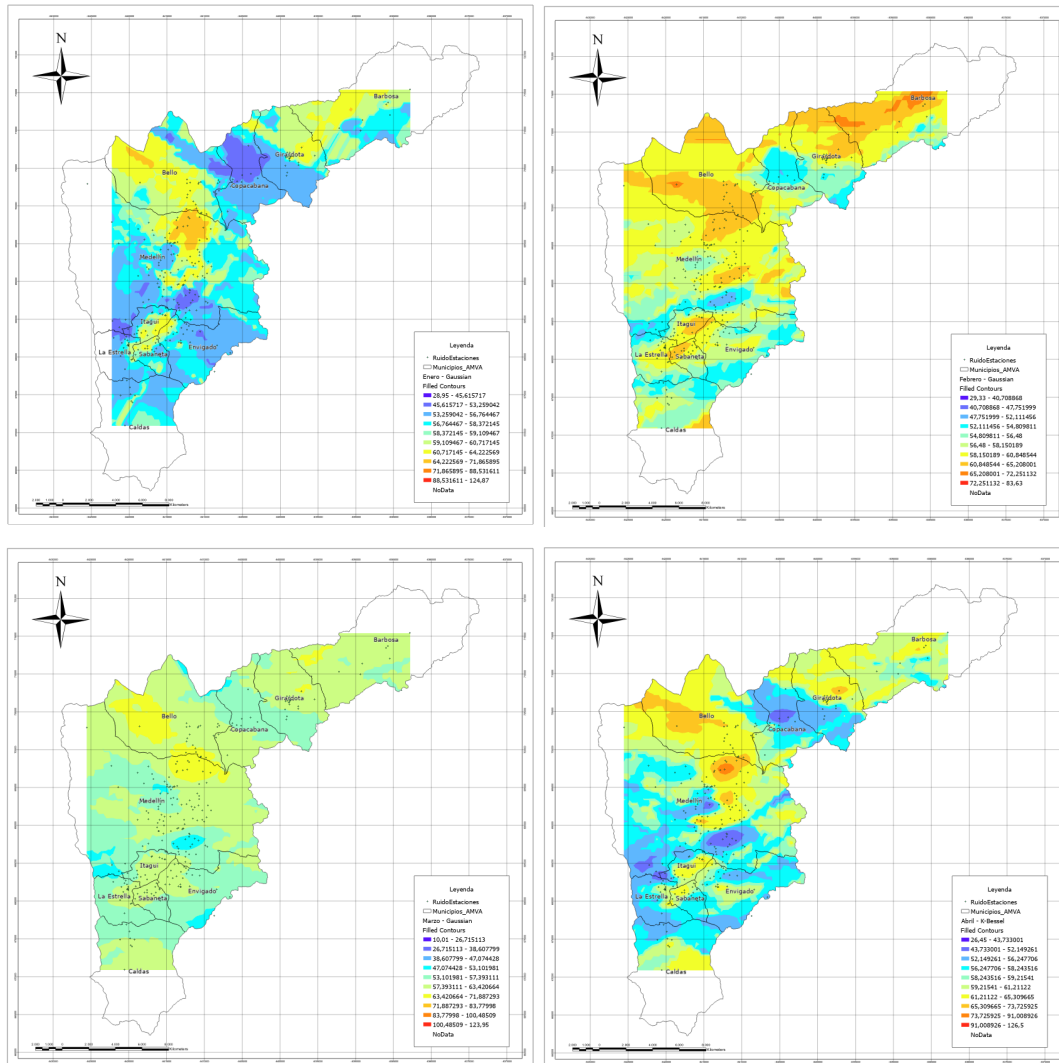
En conclusión, con base en los análisis espaciales presentados en las Figuras 2 a 7 y en los resultados de estacionariedad sintetizados en la Tabla 2, se evidencia que el comportamiento del ruido ambiental en el Valle de Aburrá durante el primer semestre del año 2025 se mantiene dentro de los límites permisibles establecidos por la Resolución 627 de 2006 para los periodos diurnos. Ninguno de los meses evaluados supera los valores máximos de presión sonora establecidos para las distintas zonas urbanas, lo que indica que, desde el punto de vista normativo, no se presenta un escenario de contaminación acústica en el área de estudio.

Sin embargo, aunque los niveles registrados cumplen con la normativa, el análisis comparativo entre meses muestra variaciones espaciales significativas que reflejan dinámicas urbanas complejas. Durante enero y febrero se conserva una distribución relativamente



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

homogénea, con niveles moderados y áreas puntuales de mayor incidencia de ruido. A partir de marzo, y con mayor claridad en abril, mayo y junio, se observa un incremento en el ruido, especialmente marcado en junio, cuando las zonas sur y suroriental registran una disminución notable de los niveles de ruido, mientras que las zonas norte y noroccidental presentan un aumento.



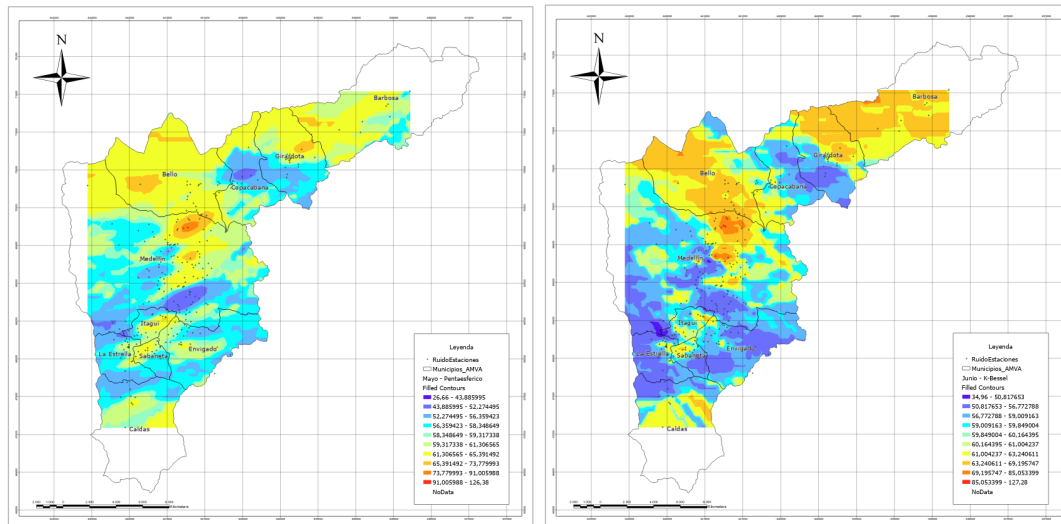


Figura 8. Comportamiento espacio temporal del ruido de enero a junio de 2025.

En la Figura 8 se muestra el comportamiento espacio temporal del ruido entre los meses de enero y junio. Se evidencia una dinámica marcada por variaciones tanto en la intensidad de los niveles de ruido como en la forma en que estos se distribuyen espacialmente. En términos generales, los resultados obtenidos mediante kriging y los diferentes modelos de semivariograma aplicados indican que, aunque la distribución del ruido mantiene patrones recurrentes asociados a la urbanización y a la red vial, también muestra cambios mensuales que responden a factores como la dinámica urbana propias del Valle de Aburrá.

Durante el primer trimestre (enero, febrero y marzo), el comportamiento del ruido presenta una estructura relativamente estable, con zonas críticas bien definidas y transiciones espaciales suaves. En estos meses, el modelo Gaussian fue el de mejor desempeño, lo que sugiere una correlación espacial continua y progresiva entre áreas de mayor y menor intensidad de ruido. A nivel espacial, los mapas muestran concentraciones de ruido en corredores viales principales y sectores densamente urbanizados, mientras que las zonas periféricas conservan valores más bajos y homogéneos.

En el segundo trimestre se observan variaciones más notorias en la estructura espacial del fenómeno. En abril y junio, el modelo K-Bessel fue el más adecuado, reflejando un comportamiento más complejo del ruido, con gradientes espaciales más contrastados y fluctuaciones más marcadas entre zonas cercanas. En estos meses se aprecia un aumento significativo del ruido en el norte y noroccidente del valle, mientras que hacia el sur se evidencian

disminuciones marcadas, especialmente en municipios como Envigado, Itagüí, Sabaneta y La Estrella. Mayo, por su parte, presentó un ajuste óptimo con el modelo Pentaesférico, lo que indica un comportamiento intermedio: aunque las zonas de alta intensidad se mantienen bien delimitadas, las transiciones hacia niveles más bajos no son tan suaves como en los meses iniciales.

En conjunto, el análisis del comportamiento del ruido entre enero y junio revela que el fenómeno conserva un patrón persistente de concentración en áreas urbanas consolidadas. La tendencia observada muestra periodos de atenuación seguidos por episodios de intensificación, con un contraste espacial particularmente marcado entre el norte y el sur del valle durante junio. Finalmente, la variación en los modelos de mejor ajuste a lo largo del semestre confirma que el ruido ambiental no depende únicamente de la ubicación de las fuentes, sino también de dinámicas urbanas en constante transformación. Este comportamiento refuerza la importancia de emplear metodologías geoestadísticas robustas para capturar adecuadamente la complejidad del fenómeno sonoro en territorios metropolitanos como el Valle de Aburrá.

En el año 2015 el AMVA presentó un informe denominado “Actualización de los mapas de ruido de la zona urbana de los municipios de Bello, Itagüí y Medellín” (AMVA, 2015) en donde se muestran mapas de ruido para el área metropolitana calculados con el software SoundPLAN.

Estos mapas no presentan un análisis del comportamiento temporal del fenómeno en estado estable para cada uno de los meses del año 2015. En este trabajo se muestra una metodología mediante el uso de interpoladores espaciales del tipo geoestadísticos que permite hacer análisis del comportamiento del ruido en distintas zonas del área metropolitana y en cada uno de los meses del primer semestre del año 2025. Los mapas obtenidos mediante esta metodología ofrecen detalles de comportamiento del patrón espacial y temporal del ruido que se constituyen en una herramienta para la gestión ambiental y de control de la contaminación acústica. Estos hallazgos complementarían de manera importante los resultados del estudio del fenómeno de contaminación acústica realizados por la autoridad ambiental implementando otras metodologías.



7 Conclusiones

El análisis geoestadístico permitió caracterizar adecuadamente el comportamiento espacio temporal del ruido ambiental en el Valle de Aburrá durante el primer semestre de 2025, evidenciando patrones consistentes de concentración en zonas urbanas consolidadas y corredores viales principales que son coherentes con los estudios realizados usando otras metodologías por parte de la autoridad ambiental. La aplicación de Kriging con diferentes modelos facilitó la identificación de las estructuras espaciales más representativas para cada mes, demostrando la importancia de ajustar el modelo a la dinámica temporal del fenómeno.

La variabilidad mensual en la selección del modelo de mejor ajuste indica que el ruido no presenta un patrón espacial estático, sino que experimenta cambios significativos relacionados con condiciones meteorológicas, dinámicas urbanas y variaciones en la intensidad de las fuentes emisoras. Mientras que durante el primer trimestre predominaron los modelos Gaussianos, en los meses siguientes el patrón espacial del fenómeno se puede caracterizar con los modelos K-Bessel y Pentaesférico.

El estudio confirma la utilidad de los métodos geoestadísticos en la planificación y gestión ambiental, ya que permiten identificar zonas críticas de exposición al ruido y servirían de apoyo para la toma de decisiones orientadas a mitigar la contaminación acústica en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

El estudio del ruido durante el primer semestre del 2025 mediante interpoladores espaciales geoestadísticos, permitió evidenciar que el fenómeno de la contaminación acústica en el área de estudio durante el primer semestre del año 2025 cumple con la norma ambiental, sin embargo; no se deben disminuir los esfuerzos de las autoridades ambientales para continuar con los procesos de control del ruido.

Los resultados obtenidos en este trabajo ofrecen detalles de comportamiento del patrón espacial y temporal del ruido que se constituyen en una herramienta para la gestión ambiental y de control de la contaminación acústica. Estos hallazgos complementarían de manera importante los resultados del estudio del fenómeno de contaminación acústica realizados por la autoridad ambiental implementando otras metodologías.



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Los resultados obtenidos en este trabajo ofrecen una fuente importante de análisis para el fenómeno del ruido que podrían servir de insumos para la integración con políticas públicas, el ordenamiento del territorio y la definición de estrategias de movilidad sostenible; para el mejoramiento de la calidad de vida de la población del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.



Referencias

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (s.f.). Ruido ambiental. <https://www.metropol.gov.co>

Congreso de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993: Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables. Diario Oficial No. 41.146.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). Resolución 0627 de 2006: Por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental.

Ministerio de Salud. (1983). Resolución 8321 de 1983: Por la cual se dictan normas sobre protección y conservación de la audición en los ambientes de trabajo.

Organización Mundial de la Salud. (2018). Environmental Noise Guidelines for the European Region. WHO Regional Office for Europe.

Secretaría Distrital de Ambiente. (s.f.). Ruido ambiental. <https://www.ambientebogota.gov.co>

Unión Europea. (2002). Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. American Psychological Association [APA]. (2020). *Publication Manual of the American Psychological Association* (7^a ed.). American Psychological Association.