Revisión al estado del arte de la modelación geoespacial del ruido por tráfico de carreteras

Review of the State of the Art of the Geospatial Modeling of Road Traffic Noise

González-Lozano, Raúl; Rodríguez Hernández, Silvio Vioel

Raúl González-Lozano
rglozano@vcl.geocuba.cu
EMPRESA DE SOLUCIONES GEODÉSICAS y AMBIENTALES (GEODESA), GEOCUBA, Cuba

Silvio Vioel Rodríguez Hernández
silvio@uct.geocuba.cu
GEOCUBA UCT-IC, Cuba

Revista Cubana de Transformación Digital
Unión de Informáticos de Cuba, Cuba
ISSN-e: 2708-3411
Periodicidad: Trimestral
vol. 3, núm. 2, 2022
rctd@uic.cu

Recepción: 12 Marzo 2022
Aprobación: 11 Mayo 2022

URL: http://portal.amelica.org/ameli/journal/389/3893437001/

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Resumen: Lograr una descripción efectiva de la contaminación acústica requiere la con- vergencia de una serie de especialidades que otorgan un carácter multidisci- plinario a los estudios de ruido, entre las cuales ocupa un lugar importante la modelación geoespacial. La labor de esta disciplina, dentro del marco de los estudios acústicos, se enfoca a interpretar y representar aspectos tanto cuanti- tativos como cualitativos de este tipo de contaminación y ofrecer la posibilidad de analizar su impacto sobre un área geográfica, más o menos extensa. Esta labor, se ha visto favorecida por el desarrollo científico y tecnológico en mate- ria de software y hardware que ha posibilitado la automatización de métodos, el desarrollo de nuevos algoritmos y ha ampliado el impacto de los resultados al lograr un mayor alcance y difusión social, todo favorecido por los procesos de transformación digital de la sociedad moderna. La presente investigación persigue como objetivo general, llevar a cabo una revisión crítica de los princi- pales trabajos relacionados con métodos empleados para la modelación geoes- pacial del ruido, haciendo énfasis en el ruido provocado por el tráfico de ca- rreteras, e identificar las principales deficiencias y fortalezas de cada método. Para ello se consultaron 136 publicaciones indexadas en bases de datos como *Scopus* y *Google Scholar,* entre los años 2005 y 2022, de las cuales, 94, fueron
citadas directamente en el estudio. Como conclusión del trabajo se evidencia la existencia de numerosos métodos para modelar geoespacialmente el ruido, favorecidos por el desarrollo científico tecnológico. Finalmente se exponen las principales deficiencias y bondades en la aplicación de cada uno de ellos.

Palabras clave: Modelación geoespacial del ruido, Monitoreo colaborativo, Sensores Acústicos, Tráfico de carreteras.

Abstract: *Achieving an effective description of noise pollution requires the convergence of a series of specialties that give noise studies a multidisciplinary character, among which geospatial modeling occupies an important place. The work of this disci- pline, within the framework of acoustic studies, focuses on interpreting and re- presenting both quantitative and qualitative aspects of this type of pollution and offering the possibility of analyzing its impact on a more or less extensive geogra- phical area. This work has been favored by the scientific and technological deve- lopment in software and hardware that has enabled the automation of methods, the development of new algorithms and has increased the impact of the results by achieving greater reach and social dissemination, all favored by the digital transformation processes of modern society.*

The present investigation pursues as a general objective, to carry out a critical review of the main works related to me- thods used for the geospatial modeling of noise, emphasizing the noise caused by road traffic, and to identify the main deficiencies and strengths of each. method. For this, 136 publications indexed in databases such as Scopus and Google Scho- lar were consulted, between the years 2005 and 2022, of which 94 were directly cited in the study. As a conclusion of the work, the existence of numerous methods for geospatially modeling noise, favored by scientific and technological develop- ment, is evidenced. Finally, the main deficiencies and benefits in the application of each one of them are exposed.

Keywords: Geospatial modeling of noise, Collaborative monitoring, Acoustic Sensor, Road traffic..

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico y social que se ha ido produciendo a escala mundial, fundamental- mente durante las últimas décadas, ha supuesto un incremento importante del número de

personas que habitan en ciudades y de la cantidad y nivel de utilización de las infraestructuras de transporte (Buhaug & Urdal, 2013; Mohsin, Abbas, Zhang, Ikram, & Iqbal, 2019). Estos he- chos han originado un aumento progresivo de los niveles de ruido existentes, tanto en entor- nos urbanos como rurales, desembocando en un problema de importante calado, como es el de la contaminación acústica. Su efecto nocivo sobre distintas dimensiones de la vida humana se encuentra ampliamente documentado, entre ellas, resalta la salud (Clark & Paunovic, 2018; Münzel, Schmidt, Steven, Herzog, & Daiber, 2018; Neitzel, 2018) y la economía (Bravo-Mon- cayo et al., 2019; Moncayo, 2017), entre otros.

Paralelo al aumento de la contaminación acústica se han desarrollado esfuerzos multidis-

ciplinarios desde la comunidad científica, como respuesta a este problema. Una de las disci- plinas que mayor presencia ha tenido en los estudios sobre contaminación acústica, ha sido la modelación geoespacial, asumiendo la interpretación y representación de aspectos de carácter cuantitativo y cualitativo del ruido y ofreciendo la posibilidad de analizar el impacto de este fenómeno sobre una zona geográfica, más o menos extensa (Alam, Ahmad, Afsar, & Akhtar, 2020; Brito, 2017). Esta disciplina se ha visto favorecida por el desarrollo científico tecnológico en materia de software y hardware que ha posibilitado la automatización de métodos, el de- sarrollo de nuevos algoritmos y ha ampliado el impacto de los resultados al lograr un mayor alcance al público, todo favorecido por los procesos de transformación digital de la sociedad moderna (I. F. Pérez, Mendoza, Hermida, & Herrera, 2020; Zhang, Zhao, & Dong, 2020).

En este sentido, muchos investigadores se han dado a la tarea de pensar y aplicar distintos métodos para representar, de forma efectiva, una situación acústica existente o pronosticada. Estos métodos son, comúnmente, transversales a las disciplinas científicas y parten, desde muestreos puntuales y estudios geoestadísticos (Bilewu, Salami, Ayanshola, & Yusuf, 2019; Chappa, 2021; Contreras, 2019; Jácobo, García, Zare, & Centeno, 2020; Maman, Paucara, Es- pinoza, Maman, & Pérez, 2021; Martín & Mateo, 2021; I. F. Pérez et al., 2020; Ponze Cateriano & Sierra Sacasqui, 2020; Torres, 2021; Valdez & Aquino, 2020), hasta modelaciones matemá- ticas y análisis en tiempo real (Asensio et al., 2021; Batura & Waligórski, 2021; Faulkner & Murphy, 2022; Iglesias Merchan, Laborda Somolinos, González Ávila, & Elena Rosselló, 2021; Mendoza, 2021). La mayoría de estos métodos brindan, como producto final, la modelación geoespacial de la situación acústica (Alam et al., 2020).

En este contexto, el presente trabajo persigue, como objetivo general, llevar a cabo una re-

visión crítica de los principales estudios relacionados con métodos para la modelación geoes- pacial del ruido, indexados en *Sciencedirect*, base de datos de corriente principal *Scopus* y *GoogleAcademic*. Se aclara que estos trabajos son analizados partiendo de un criterio propio, creado mediante el escrutinio de la literatura disponible acerca del tema.

En el acápite **Metodología** se explica la manera de abordar el estudio mediante el aná- lisis de diversos indicadores bibliométricos para la selección de la bibliografía relevante y la identificación de dos tendencias fundamentales en los métdos de los estudios que implican la modelación geoespacial del ruido por tráfico de carreteras: métodos basados en mediciones sonométricas directas y métodos predictivos. En el acápite **Desarrollo** se abordan cuestiones

relativas a cada una de las tendencias identificadas y sus subdivisiones. De esta manera se ex- ponen, desde el punto de vista del autor, las principales deficiencias y ventajas de cada método. Finalmente se discuten los resultados analizados y se exponen las conclusiones. Cada uno de estos acápites ayuda al cumplimiento del objetivo general y guía al lector crítico por un análi- sis global y estructurado sobre el tema, hasta derivar, finalmente, en una serie de conclusiones que resumen los principales resultados de los análisis contenidos en el trabajo.

METODOLOGÍA

El presente trabajo desarrolla una revisión crítica de las principales investigaciones relaciona- das con los métodos de modelación geoespacial del ruido por tráfico de carreteras mediante un estudio exploratorio-descriptivo, cuyo marco temporal es el periodo 2005-2022. Las uni- dades de estudio fueron los artículos científicos originales que se relacionan de manera direc- ta con el ámbito de la modelación geoespacial del ruido por tráfico de carreteras, indexados en Sciencedirect, base de datos de corriente principal Scopus y Google Academic. A partir de determinar la fuente de información para la identificación de los artículos originales, se rea- liza una estrategia de búsqueda genérica para recuperar el mayor número posible de referen- cias publicadas durante el período de estudio. Se seleccionaron las palabras claves en inglés: *"noise map", "noise modelling", "road traffic noise*" y su correspondientes al idimoa español, las cuales se combinaron mediante ecuaciones de búsqueda. Los criterios de búsqueda estableci- dos fueron: artículos de investigación originales, en el período 2005-2022, donde las palabras claves estuvieran incluidas en el título, palabras claves o resumen. La normalización de los re- sultados obtenidos de la búsqueda se realiza con la ayuda del gestor bibliográfico *Endnote X7*. Se empleó el software *BibExcel* y *VOSviewer* para la realización de análisis bibliométricos. En aras de garantizar la representatividad de los trabajos seleccionados para esta investigación se emplearon los pasos propuestos por (Ivanović & Ho, 2019), quienes recomiendan el empleo de la metodología PRISMA para las revisiones sistemáticas de la literatura.

El primer paso de la metodología se desarrolla a través de la obtención de los artículos a incluir en el estudio. Con este fin, un análisis de palabras claves fue desarrollado en las bases de datos ScienceDirect y Google Academic. Las palabras claves fueron seleccionadas de térmi- nos comúnmente empleados en la literatura académica relacionada a este constructo. Estas palabras clave fueron combinadas empleando los operadores de las bases de datos para garan- tizar diversas salidas de resultados. Los criterios de inclusión considerados fueron la presencia de estas palabras clave en la sección "Titulo, Resumen o Palabras Clave" de los artículos. Para esta investigación, solo se consideraron artículos completos publicados en idioma inglés y es- pañol. El número de trabajos obtenidos en esta búsqueda inicial fue de 548.

El segundo paso de la metodología PRISMA es remover los archivos duplicados obtenidos de la búsqueda en ambas bases de datos. A partir del empleo del software *EndNote Reference Manager*, se desarrolló una búsqueda de archivos duplicados, obteniendo una salida de 327 artículos. Luego, aunque el proceso de selección incluye la presencia de palabras clave en las

secciones anteriormente mencionadas, a través de la lectura de los títulos y resúmenes se en- contraron artículos no relacionados al propósito de este estudio, los cuales fueron eliminados. Un total de 132 artículos fueron excluidos, obteniéndose un total de 195 artículos para ser analizados en su totalidad.

El último paso consiste en la lectura completa de los artículos, para seleccionar la mues- tra final a incluir en la revisión sistemática y el estudio bibliométrico. A través de la lectura a profundidad se identificaron 59 artículo que no cumplían con los criterios de inclusión de la investigación o cuyos resultados eran inconclusos. De esta forma, una lista final de 136 artí- culos fue seleccionada para el análisis.

Para la evaluación de la calidad de los artículos seleccionados, se analizaron diferentes indicadores bibliométricos como la productividad por revistas, productividad por autores, análisis social de colaboración, productividad por regiones y principales líneas de producción académica. Se cuestionó el nivel de impacto de las revistas donde se publican los trabajos, y se agrupan los artículos alrededor de dos métodos fundamentales para la modelación geoespa- cial del ruido por tráfico de carreteras: métodos basados en mediciones sonométricas directas y métodos predictivos. Finalmente, se evaluaron las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos estudiados y se analizaron los principales resultados alcanzados en el tema

DESARROLLO

Los métodos estudiados de modelación geoespacial del ruido por tráfico de carretera, para su análisis se pueden dividir en **métodos basados en mediciones sonométricas directas**, que a su vez pueden ser en tiempo real y con desfase del tiempo, y en **métodos predictivos**.

Empleo de métodos basados en mediciones sonométricas directas para la modelación geoespacial del ruido por tráfico de carretera

Una de las maneras de abordar la modelación geoespacial de los niveles de ruido es a partir de la interpolación de valores, mediante diversas técnicas, referidos a un indicador de ruido, medidos *insitu*. Estos valores son obtenidos directamente en campo a partir de diversas metodologías. En la bibliografía consultada acerca del tema se observan, esencialmente, dos variantes de cap- tación de datos: la primera a través de sonómetros manuales, en campañas de mediciones y con un tiempo de duración limitado (Ali, Hama, & Ali, 2017; Cárdenas, 2012; O. Delgado & Mear- tínez, 2015; Lozano & Betancourt, 2018; Mamani, Paucara, Vilca, Espinoza, & Pérez, 2019; Ro- jas, 2019; Sotolongo & Suárez, 2014) y la segunda, referida a mediciones con sonómetros fijos en puntos establecidos que miden los niveles de ruido en un dominio continuo del tiempo (Alías, Alsina-Pagès, Socoró, & Orga, 2018; L. A. S. Pérez, 2011; Villacreses, Munizaga, & V, 2016). Apa- recen también, trabajos relacionados con los monitoreos colaborativos, que pueden establecerse en cualquiera de los dos grupos anteriores, pues las mediciones colaborativas pueden ser envia- das a un servidor para su procesamiento en tiempo real o de forma diferida (Grubeša, Petošić, Suhanek, & Đurek, 2018; Gutiérrez, 2019; Hipólito, Moreno-Ibarra, & Torres-Ruiz, 2017).

ModelacIón geoespacIal del rUIdo a partIr de medIcIones sonométrIcas en tIempo real

El creciente desarrollo del Internet de las Cosas ha posibilitado el avance de la captación y mo- delación geoespacial de la contaminación acústica por tráfico rodado (R. Delgado, 2022) y, por tanto, la proliferación, especialmente en países primermundistas, de redes de sensores ina- lámbricos diseñados específicamente para monitorear y gestionar la contaminación acústica en las ciudades inteligentes, que se han denominado Redes de Sensores Acústicos Inalámbri- cos (WASN por sus siglas en inglés) (Alías et al., 2018). Este desarrollo ha sido posible también en parte, gracias a la disponibilidad de hardware más barato y más pequeño e innovaciones en las redes de comunicación y en el procesamiento de señales acústicas, que se utilizan prin- cipalmente para identificar las fuentes de ruido y sus características (Alías & Alsina-Pagès, 2019). Una revisión más a fondo de los distintos proyectos de WASN enfocados al monitoreo acústico en tiempo real, pero sin detallar en el aspecto de la modelación geoespacial de los niveles acústicos, se puede encontrar en (Alías & Alsina-Pagès, 2019).

Los sistemas de monitoreo permanente consisten en un conjunto de puntos distribuidos

en una zona de interés que realizan mediciones periódicas durante todo el día, captando in- formación de ruido y de otros parámetros ambientales relevantes. Todos los resultados de las mediciones se recogen, almacenan y transfieren periódicamente a un servidor central. El nú- mero de terminales (puntos de medición) del sistema de monitoreo, dependerá del área que se desea cubrir, así como, de las necesidades específicas de monitoreo (L. A. S. Pérez, 2011).

El monitoreo de ruido permanente o en tiempo real, ayuda al control del cumplimiento de los límites normados de ruido y añade otras ventajas adicionales, como mostrar las tendencias del ruido y apoyar a la elaboración de mapas de ruido. A diferencia de los mapas de ruido está- ticos, basados en mediciones puntuales históricas, cuya validez depende de que se mantengan las condiciones en las cuales se hicieron las medidas, los modelos para el desarrollo de mapas en tiempo real, permiten la actualización periódica de la estimación del ruido en la zona de estudio (L. A. S. Pérez, 2011).

En algunos sistemas, estas mediciones son interpoladas mediante distintos métodos con el fin de obtener valores en un dominio continuo del espacio que conlleven a una mayor efi- cacia en la modelación geoespacial.

En este ámbito resalta el proyecto europeo DYNAMAP (Alías *et al*., 2018; Alías & Socoró,

2017; Alsina-Pagès, Orga, Alías, & Socoró, 2019; Bellucci, Peruzzi, & Zambon, 2016; Sevillano et al., 2016) que pretende el desarrollo de un sistema de modelación geoespacial dinámica del ruido por tráfico de carreteras, enfocado en el monitoreo del impacto acústico del ruido del tráfico en tiempo real.

Este proyecto se desarrolla inicialmente en dos áreas piloto de Italia, una que se correspon- de a un ambiente suburbano en una vía de Roma y otra que se vincula a un ambiente urbano en la ciudad de Milán denominada Área 9. Los datos adquiridos se someten a un pre-proce- samiento denominado Eliminación de Eventos Anómalos de Ruido (ANED por sus siglas en inglés), donde se elimina el ruido producido por otras fuentes no relacionadas con el tráfico

automotor. Otro componente clave del sistema es la aplicación denominada NoiseMote para el procesamiento y publicación de la información final mediante una interfaz de tipo web-GIS (Alías, Alsina-Pagès et al., 2018).

Un estudio de la precisión del resultado de la modelación geoespacial en este proyecto y una variante de atenuación de errores (hasta 3dB) para los distintos grupos de carretera, se presenta en (Benocci, Confalonieri, Roman, Angelini, & Zambon, 2020) , donde se determina que la principal fuente de incertidumbre se debe a la determinación del parámetro no acús- tico Flujo de Tráfico. Se argumenta que el modelo de tráfico implementado establece serias restricciones para mantener el error de predicción dentro de los 3dB, por lo que un modelo de tráfico más realista mejoraría la precisión de los resultados.

En la misma línea, en Estados Unidos, específicamente en la ciudad de New York, se im- plementó en el año 2017 un proyecto para el monitoreo, análisis y mitigación de la contami- nación sonora urbana, denominado SONYC, cuyo significado en inglés es *Sounds of New York City*. Este proyecto sienta sus bases conceptuales en varios campos de la ciencia como el dise- ño de redes de muestreo de ruido, aprendizaje automático, computación social y colaborativa

y computación gráfica, creando una solución potencialmente transformadora de la calidad de vida para millones de personas que se encuentran afectadas por la contaminación acústica en los Estados Unidos. Los componentes de este proyecto son fundamentalmente tres (Bello et al., 2019):

- • Plataforma de bajo costo capaz de monitorear el ruido en tiempo real, de manera conti- nua y con alta precisión. Es escalable en términos de cobertura y consumo de energía.

  • Métodos de ciencia de datos de vanguardia para el análisis de ruido a gran escala, inclui- do el modelado predictivo de ruido en ubicaciones fuera de la red utilizando estadísti- cas espaciales y modelado físico. En base a esto se desarrolla la visualización interactiva en 3D de la actividad del ruido permitiendo una mejor comprensión de los patrones de ruido. Como parte de modelación geoespacial desarrollada se utilizan herramientas de recuperación de información que aprovechan la topología de los eventos de ruido para facilitar la búsqueda y el descubrimiento de información.

• Utilización del marco de detección y análisis para la mejora de las actividades de mitiga- ción de dos maneras: primero, al permitir una planificación optimizada y basada en da- tos y la programación de inspecciones por parte del gobierno local, por lo tanto, es más probable que se detecten y se hagan cumplir las violaciones del código; y en segundo lu- gar, aumentando el flujo de información hacia quienes están en posición de controlar las emisiones (como los administradores de edificios y sitios de construcción, conductores y vecinos) proporcionando así incentivos creíbles para la autorregulación. Debido a que el sistema monitorea y analiza constantemente la contaminación acústica, genera infor- mación que se puede utilizar para validar y refinar iterativamente cualquier estrategia de mitigación del ruido.

Existen, además de los mostrados anteriormente, otros proyectos WASN (Alías & Alsi- na-Pagès, 2019), entre los que se pueden mencionar Medusa (C. Mietlicki & Mietlicki, 2018),

MONZA (Bartalucci et al., 2018), UrbanSense (Rainham, 2016), RUMEUR, (F. Mietlicki, Miet- licki, & Sineau, 2015), entre otros. En el presente trabajo se describe con mayor profundidad los proyectos SONIC y DINAMAP por ser los más abordados ampliamente en la literatura y por abarcar hasta la etapa de modelación geoespacial de ruido, elemento del que carecen mu- chos de los proyectos WASN.

En el ámbito internacional resaltan trabajos vinculados con lo que se denomina Informa- ción Geográfica Voluntaria (VGI por sus siglas en inglés) que según (Goodchild, 2007 cit. en (Hipólito et al., 2017) viene a ser aquella generada con un esfuerzo intencional y consciente por la comunidad de usuarios con poca o nula educación, experiencia o entrenamiento en geografía o cartografía; es decir, por los neogeógrafos. Estos trabajos se enfocan especialmen- te al desarrollo de arquitecturas de base de datos escalables y paralelas para el procesamien- to eficiente de grandes colecciones de datos con técnicas de aprendizaje automático. De esta manera se logra hacer predicciones de los niveles de ruido esperados en lugares con nulas o escasas mediciones.

Un trabajo destacado en este sentido se muestra en (Hipólito et al., 2017), donde se expli-

ca el desarrollo de una aplicación móvil que modela geoespacialmente, mediante el uso de la VGI, el ruido existente en distintos lugares de la Ciudad de México.

Existen otras aplicaciones similares en su concepción a la descrita en (Hipólito et al., 2017).

Entre las cuales está *Laermometer*, la cual es una aplicación que recolecta señales de audio de los dispositivos móviles y las envía a un servidor, permitiendo visualizar la modelación geoes- pacial del ruido en una interfaz web (Bilandzic et al., 2008). *NoiseSPY* contiene un portal web en el que se despliegan modelaciones geoepaciales del ruido en tiempo real (Kanjo, 2010). *NoiseTube* permite a los usuarios capturar mediciones de ruido utilizando su dispositivo mó- vil, para crear, con esas capturas, modelaciones geoespaciales del ruido que son mostradas en un portal web (Maisonneuve, Stevens, Niessen, & Steels, 2009). NoiseCapture constituye una aplicación móvil para la captura de niveles de ruido y su posterior envío a un servidor que pro- cesa los datos y luego posibilita la visualización de los mismos en un entorno web, entre otras prestaciones (Graziuso, Grimaldi, Mancini, Quartieri, & Guarnaccia, 2020). Ear-Phone es un sistema que muestra en un portal web modelaciones geoespaciales de ruido generadas por las mediciones capturadas con los dispositivos móviles de los usuarios y que fueron enviadas a un servidor central (Rana, Chou, Bulusu, Hu, & Kanhere, 2009). NoiseMap colecta medicio- nes de ruido, consta de una aplicación móvil y se apoya en otra plataforma web de monitoreo (Schweizer, Bartl, Schulz, & Probst, 2011). NoiseWatch incluye mediciones de ruido tanto de fuentes científicas oficiales como de VGI, los usuarios voluntarios pueden ingresar desde una plataforma web o desde sus dispositivos móviles (Jirka, Bröring, Kjeld, Maidens, & Wytzisk, 2012). También hay aplicaciones que usan técnicas de juegos para motivar a la gente a parti- cipar voluntariamente, tales como *Noise Battle*, donde el objetivo del usuario es conquistar el mayor número de celdas posibles, lo cual se consigue tomando más y mejores mediciones de ruido en dichas áreas que otros jugadores y evitar perderlas, lo cual ocurre cuando otro usua- rio se vuelve quien conquiste el área de la misma manera (Karolus, 2013).

Sin duda el empleo de técnicas colaborativas imprime gran potencia a la generación de datos útiles en estudios científicos de toda índole. Como aspecto social, ubica al ciudadano común en una posición activa

en el análisis y solución de problemas tradicionalmente reclui- dos a élites académicas o administrativas. Pero el uso de datos colaborativos, con un relativo bajo costo de adquisición, compromete en muchas ocasiones la precisión de los mismos y por ende la modelación geoespacial derivada de estos. En el caso concreto de las mediciones so- nométricas con dispositivos móviles, intervienen esencialmente tres fuentes de errores: espa- cial, temporal e instrumental. De ellos el más importante y ampliamente tratado es el error instrumental. Relacionado con esto en (Murphy & King, 2016) se realiza un detallado análisis basado en el estudio del comportamiento de 100 móviles de diversos fabricantes y modelos mediante 1472 pruebas de desempeño distintas. La precisión de las mediciones de distintas aplicaciones en teléfonos, con diferentes sistemas operativos (Android y iOS), edad, modelo y marca, presentaron una amplia variación respecto a los niveles de referencia, lo cual, según (Murphy & King, 2016), hace que su fiabilidad sea cuestionable. De manera general se infiere la influencia del hardware mediante la comparación de diferentes modelos, marcas y edades, sin embargo, como una de las conclusiones del estudio se plantea la necesidad realizar es- tudios más profundos sobre la influencia de los diferentes micrófonos en la exactitud de las mediciones, tal como lo implica tentativamente el resultado del estudio. El estudio concluye que los dispositivos móviles no están aún en condiciones de reemplazar a los sonómetros tra- dicionales, sin embargo, los avances en software y hardware de los últimos años han creado condiciones para el desarrollo de un amplio marco de aplicaciones que pueden jugar un im- portante papel en estudios futuros.

ModelacIón geoespacIal del rUIdo a partIr de medIcIones sonométrIcas con desfase del tIempo

La modelación geoespacial del ruido basada en la interpolación de niveles de presión sonora obtenidos a partir de mediciones directas con desfase del tiempo, es un método tradicional- mente empleado por la comunidad científica para el estudio de la contaminación acústica (Ali et al., 2017; Alva & Diaz, 2019; Cárdenas, 2012; Castillo, 2019; Cepeda & Garzón, 2011; O. Delgado & Meartínez, 2015; Fecht et al., 2016; Flórez, Mosuqera, Ramón, & Caballero, 2019; Gómez, 2017; López-Quílez & Muñoz , 2009; Lozano & Betancourt, 2018; Luque, 2019; Ma- mani et al., 2019; Murillo, Ortega, Carrillo, Pardo, & Rendón, 2012; Olayinka Oyedepo et al., 2019; Orellana, 2014; Ponze Cateriano & Sierra Sacasqui, 2020; Rojas, 2019; Silva & Guevara, 2019; Sotolongo & Suárez, 2014; Suárez, 2015). Este método puede encontrarse aplicado den-

tro de la literatura, basado esencialmente en técnicas geoestadísticas. En la mayoría de estos estudios se emplean las bondades de los Sistemas de Información Geográficas (SIG) para la elaboración de los modelos geostadísticos.

Uno de los principales problemas es la elección del método de interpolación para la de- terminación del ruido en lugares no estudiados. En tal sentido, en (Murillo et al., 2012) se realiza un estudio comparativo de diferentes métodos de interpolación para la modelación

geoespacial del ruido, obteniéndose como conclusión que una de las desventaja de estos pro- cedimientos es que, debido a que los métodos de interpolación no contemplan la manera como se propaga el sonido y la existencia de fenómenos acústicos como absorción, reflexión, difracción y atenuación generados por edificaciones y demás objetos existentes en el entorno, la representación de los niveles de presión sonora presenta grandes divergencias con relación al comportamiento del fenómeno in situ. Otra de las conclusiones es que, de acuerdo a los resultados, el mejor método de interpolación para la generación de isofonas (curvas que unen puntos con igual nivel de sonido) es el Kriging, hecho que se ve corroborado por su empleo en otros trabajos durante la modelación geoestadística como en (O. Delgado & Meartínez, 2015; Maman et al., 2021; Mamani et al., 2019).

Otro aspecto importante dentro de la modelación geoespacial es la determinación de la

escala de trabajo óptima para reflejar determinado fenómeno. En esta dirección, en (Gómez, 2017), se realiza un análisis sobre la resolución espacial requerida para la modelación geoespa- cial del ruido por interpolación de acuerdo a diferentes entornos acústicos. Para ello, se consi- deran varios escenarios simples, basados en propagación a campo libre (Figura 1-A) y algunos ambientes complejos (urbanos).

Dentro del estudio para la evaluación de la exactitud de los resultados, se utilizan simu- laciones numéricas utilizando el software *SoundPLAN* y mediciones de ruido, en una zona piloto de la ciudad de Medellín, Colombia. Los resultados obtenidos en el trabajo se exponen en la Figura 1-B.

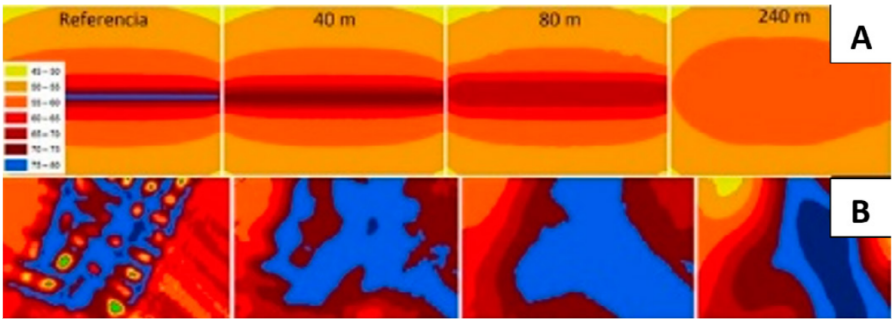

Figura 1. Escenarios simples basados en propagación a campo libre (A) y simulación de escenario complejo (B). Fuente: (Gómez, 2017).

FIGURA 1.
Escenarios simples basados en propagación a campo libre (A) y simulación de escenario complejo (B)
Fuente: (Gómez, 2017).

Como conclusiones del estudio se arriba a que en entornos en que los niveles de ruido va- rían rápidamente de manera significativa, un menor distanciamiento entre puntos de medi- ción, es requerido. De igual manera se concluye que en estudios, en los cuales la propagación del sonido debe ser caracterizada con detalle, una resolución espacial de, como mínimo, 40 m es requerida y que un distanciamiento de 80 m entre puntos de medición, es suficiente para evaluaciones globales de la condición acústica en entorno urbanos (Gómez, 2017).

La necesidad de incrementar los puntos de muestreo directos en campo, para lograr dismi- nuir errores en los resultados de la modelación geoespacial mediante técnicas geoestadísticas, hace que esta forma de elaborar mapas de ruido se haga insostenible en tiempo y recursos, cuando el área de estudio tiende al incremento.

En Cuba, este es el método de modelación geoespacial empleado que con mayor frecuencia se observa en la bibliografía. En (Sotolongo & Suárez, 2014) se hace la modelación geoespacial del ruido urbano para el municipio de Regla, en la provincia de La Habana. Para ello se desa- rrolla un modelo geostadístico sobre el SIG *Mapinfo* a partir de mediciones *in situ* que luego son ajustadas e interpoladas. En el estudio, los autores verifican los niveles de exposición al ruido y los comparan con la legislación cubana, estableciendo asociaciones entre las fuentes de ruido y las zonas afectadas. A partir de los resultados clasificaron la zona de estudio en cua- tro sectores: zona de contaminación (mayor a 75 dB con un área de 0.39 km2), zona de alerta (entre 60 y 75 dB con un área de 2.18 km2), zona aceptable (entre 50 y 60 dB con un área de 0.71 km2) y la zona óptima (entre 40 y 50 dB con un área de 0,0081 km2).

Un trabajo especialmente enfocado al uso de métodos geoestadísticos se muestra en (Gon- zález-Lozano & Betancourt, 2018), donde se propone un procedimiento para la modelación geoespacial del ruido a grandes escalas. Para ello se obtienen mediciones puntuales que son analizadas posteriormente en gabinete. A partir de este análisis se realiza el análisis explora- torio de los datos, se ajustan estos a un variograma teórico, se procede a la interpolación por el método Kriging y finalmente se aplica la validación cruzada para observar la exactitud de las predicciones. Para la implementación del flujo de trabajo se hace uso de las herramientas incorporadas en el SIG ArcGis.

Empleo de métodos predictivos para la modelación geoespacial del ruido por tráfico rodado La modelación geoespacial del ruido, mediante métodos predictivos, emplea formulaciones establecidas en diversos estándares, que dependen del país de origen del modelo, para pre- decir la situación acústica en una zona determinada. El fundamento matemático está basado en ecuaciones que modelan la emisión y pa

propagación bajo diferente configuraciones del tráfico y el medio circundante (Alam et al., 2020; Lopez & Souza, 2020; Rincón & Ruiz, 2016; Rodrigues, 2020). Con el objetivo de minimizar tiempos de cálculo, uso de recursos humanos y de maximizar la extensión de las áreas de estudio, así como la precisión y fiabilidad de los resultados, se han desarrollado plataformas informáticas basadas en modelos de emisión y propagación acústica, que son capaces de modelar geoespacialmente los niveles de ruido.

La mayoría de los sistemas para la modelación geoespacial del ruido, se encuentran res-

tringidos a usuarios que, previamente, hayan pagado la licencia de uso de cada uno de sus módulos, lo cual representa una limitación al acceso de uso de los mismos. Otro aspecto res- trictivo, es el hecho de que estos sistemas implementan modelos de cálculos en su mayoría europeos y estadounidenses, lo que imprime ciertas restricciones a su aplicación dentro de países en desarrollo. La afirmación anterior se sustenta en que los modelos matemáticos de emisión del ruido por tráfico de carretera son modelos estadísticos desarrollados a partir de la

consideración de variables como tipos de vehículos, flujos vehiculares, tipos de vías, etc., ele- mentos que difieren considerablemente entre países con diferentes estatus económicos. Ade- más del modelo de emisión, los resultados de los modelos de propagación están relacionados, en parte, con las condiciones climáticas (temperatura, presión y humedad) y en muchos casos los ámbitos de aplicación son estrechos.

Las limitaciones anteriores representan un verdadero problema ante la necesidad de la elaboración de modelaciones geoespaciales que describan la creciente contaminación acústi- ca en muchas ciudades del mundo, por lo que se han desarrollado esfuerzos para garantizar la accesibilidad a plataformas informáticas no comerciales para este fin (Bocher, Guillaume, Picaut, Petit, & Fortin, 2019).

En la actualidad la evolución de las tecnologías de SIG hace posible, y recomendable, la modelación geoespacial del ruido directamente en los SIG, y no en paralelo, como sucede ac- tualmente en muchos métodos de cálculos recomendados, esencialmente en países europeos (Bocher et al., 2019).

En este orden los SIG ofrecen una serie de bondades que pueden ser eficientemente em-

pleadas en el desarrollo de la modelación geoespacial del ruido. Entre estas están que los da- tos de entradas a los modelos de predicción pueden ser preparados en el mismo sistema de referencia; es posible la aplicación de técnicas de análisis espacial para la detección y correc- ción de errores topológicos; la población expuesta a altos niveles de ruido puede ser mostrada usando diferentes estilos cartográficos que permitan la identificación de zonas acústicamente comprometidas a diferentes escalas, etc. (Bocher et al., 2019).

En adición, la evolución de los SIG hace posible compartir los resultados desde diferentes

roles sociales (usuarios y decisores), mediante estándares de servicios geográficos distribuidos sobre el Internet, a través de plataformas de Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) (Ma- guire & Longley, 2005;Nedovic- Budic, Crompvoets, & Georgiadou, 2011).

De acuerdo con (Abramic, Kotsev, Cetl, Kephalopoulos, & Paviotti, 2017) la aplicación de las IDE para estrategias de modelación geoespacial del ruido también permite codificar datos de manera similar, logrando así la interoperabilidad semántica entre modelos. Además, la IDE ofrece una forma natural de exponer y compartir datos en la web.

Se debe resaltar que, a pesar del desarrollo alcanzado en materia de estudios acústicos a nivel mundial, se hace compleja la identificación de softwares de código abierto con opciones de adaptabilidad a países con modelos propios y que a la vez ofrezcan suficientes garantías de precisión y exactitud en los resultados, que contribuyan a mejorar la calidad de estudios acús- ticos, principalmente en países del tercer mundo afectados por la contaminación acústica.

En (Bocher et al., 2019), se muestra un estudio a partir del empleo del software libre Or-

bisGIS, mediante un complemento denominado NoiseModelling. El fundamento matemático de la propuesta se basa en el modelo estándar de cálculo francés NMPB 2008, y en la misma se desarrolla y detalla un marco de código abierto, basado en SIG, para mapear y analizar la exposición al ruido ambiental a escala de aglomeración urbana.

La originalidad principal del marco propuesto, se basa en la plena integración de un en-

foque de modelado de ruido dentro de un software SIG en forma de un módulo de servicio. Dicha infraestructura representa, en realidad, una plataforma muy adecuada para manipular y procesar grandes cantidades de datos de entrada y salida dentro de una herramienta única y estandarizada (Bocher et al., 2019).

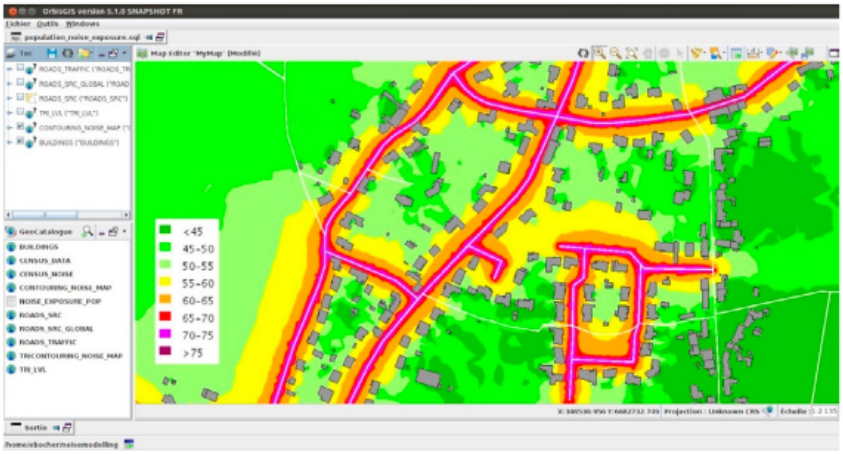

Figura 2. Ejemplo de uso de uso de complemento NoiseModelling. Fuente: (Bocher, Guillaume, Picaut, Petit, & Fortin, 2019)

FIGURA 2.
Ejemplo de uso de uso de complemento NoiseModelling
(Bocher, Guillaume, Picaut, Petit, & Fortin, 2019)

En (Gulliver et al., 2015) se expone un modelo geoespacial de ruido basado en software li- bre denominado *Traffic Noise Exposure* (TRANEX). Este modelo se programa en lenguaje *R* y ejecuta funciones de análisis espacial implementadas en *PostgreSQL* (a través de su extensión *Postgis*) y en *GRASS GIS*. El método de cálculo empleado en el desarrollo de los mapas de rui- do es el *Calculation of Road Traffic Noise Method* (CoRTN) de Reino Unido.

El desarrollo de este software para la modelación geoespacial del ruido responde esencial- mente a una necesidad práctica del software de código abierto: la necesaria optimización para el manejo eficiente de gran volumen de datos espaciales durante la modelación geoespacial del ruido de grandes áreas urbanas.

Dentro del repositorio de complementos del software QGIS, se encuentra el complemento *OpenNoise*, que permite calcular el nivel de ruido generado por el tráfico de carreteras en re- ceptores puntuales y fijos mediante el método nacional de cálculo francés *NMPB-Routes-96*, como se indica en la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo, sobre evaluación y ges- tión del ruido ambiental. Para la aplicación del modelo, en este complemento, se consideran

una serie de simplificaciones, entre las que se hallan: modelación solo en 2D (se considera que todos los puntos de recepción están a 4 m del suelo), no se calculan reflexiones o difracciones y no se considera la topografía del terreno. En la Figura 3 se observa el resultado de una mo- delación generada por el complemento *OpenNoise*.

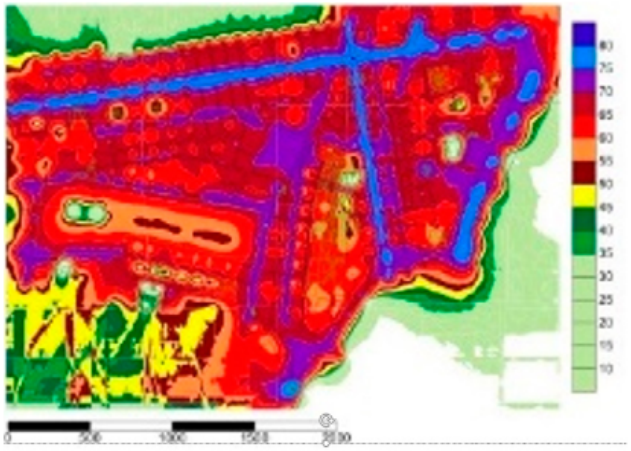

Figura 3.
Ejemplo de uso de complemento *OpenNoise*.
Fuente:
(Tortosa, Mora, & Quintanilla, 2017).

FIGURA 3.
Ejemplo de uso de complemento *OpenNoise*
(Tortosa, Mora, & Quintanilla, 2017)

Como un aspecto restrictivo a la aplicación del complemento, existe un estudio que no recomienda su empleo para la modelación geoespacial a pequeñas escalas (Tortosa, Mora, & Quintanilla, 2017).

En Cuba se observa también el desarrollo de modelos matemáticos simples que se emplean como motor de cálculo en la modelación geoespacial del ruido urbano (C. B. Pérez et al., 2015; Piñeiro & Pérez, 2006) y se menciona el uso de softwares no cubanos en zonas turísticas y en las principales ciudades del país (Remond, 2012; Salameh, 2010), aunque no se encontró evi- dencia bibliográfica de ello.

ANÁLISIS

En el contexto del presente estudio se define como modelación geoespacial a una abstracción que se realiza con el objetivo de explicar un fenómeno de la realidad, en este caso el ruido, consideran- do una dependencia principal de los elementos del espacio geográfico y cuyo marco referencial es- pacial es un sistema de coordenadas geocéntrico o topocéntrico. Estos elementos del espacio geo- gráfico son, en muchas ocasiones, los objetos que se modelan y en otras son elementos que dictan las reglas de la modelación, subordinadas a alguna relación funcional con el objeto a modelar.

En este trabajo se considera exponer las generalidades metodológicas de los distintos mé- todos de modelación geoespacial, sin ahondar en el fundamento matemático o físico, que se deriva de cada uno. Con este proceder el autor tiene la intención de ponderar la realización de una posible taxonomía de métodos dentro de la revisión bibliográfica, así como identificar líneas de trabajo y tendencias, dejando a futuros trabajos la posibilidad de ahondar en los fun- damentos matemáticos y físicos de la modelación geoespacial.

Los trabajos más relevantes en la modelación geoespacial del ruido por tráfico rodado en carreteras encontrados en la revisión bibliográfica para los últimos años se resumen en la Ta- bla 1, apreciándose que abunda la literatura respecto al tema estudiado

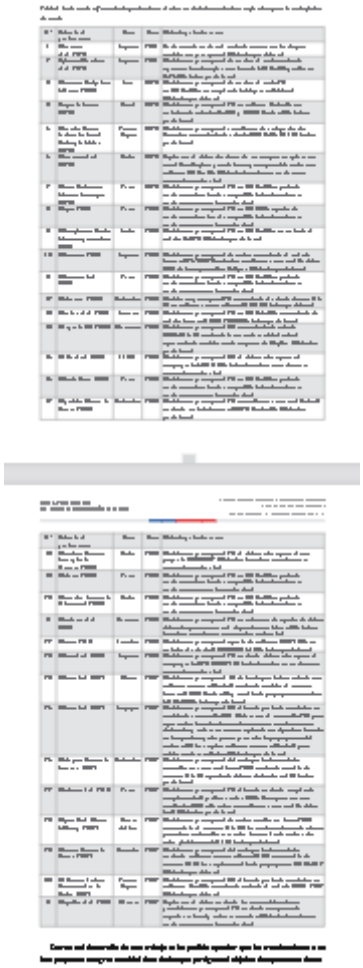

TABLA 1

Síntesis de algunos trabajos fundamentados en distintos métodos empleados para la cartografía de ruido

sf

Durante el desarrollo de este trabajo se ha podido apreciar que, internacionalmente, se han propuesto una gran cantidad de métodos que persiguen el objetivo de representar, de ma-

nera confiable, la situación acústica de un entorno que se encuentra sometido a determinadas condiciones físicas.

Los métodos de modelación geoespacial del ruido, para su estudio en el presente trabajo, se dividieron en dos grandes grupos: métodos basados en mediciones sonométricas directas y métodos predictivos.

Los métodos basados en mediciones sonométricas directas, se pueden subdividir en, mé- todos con mediciones en tiempo real y con desfase del tiempo. Entre los trabajos sobre mé- todos con mediciones en tiempo real, se encuentran aquellos que abordan temas sobre la implementación de los WASN. Se observan, en estos trabajos, algunos puntos vulnerables de estos sistemas como, el tratamiento de datos referidos a eventos anómalos de ruido, análisis del rendimiento y la capacidad computacional para el funcionamiento óptimo de los sensores, implementación de procesos para la detección de fallas en los sensores, tratamiento de fenó- menos de envejecimiento de los sensores, etc.

Los métodos basados en mediciones con desfase del tiempo son los más tradicionales, y poseen un uso recurrente en la bibliografía. Las modelaciones geoespaciales del ruido realiza- das por estos métodos presentan inconvenientes como la desviación de los resultados respecto a la situación real, por la no consideración de fenómenos físicos propios del comportamiento ondulatorio del sonido y la tendencia al

aumento de los recursos económicos y humanos, ante el incremento de resolución del estudio en aras de una mejor caracterización de la zona de análisis.

Incluidos en uno u otro grupo, se pueden encontrar aquellos estudios que poseen un ca- rácter colaborativo. Como resultado del análisis de este tipo de trabajos, se deriva una serie de deficiencias, entre las que sobresale, la diferencia de comportamiento de las aplicaciones de captación de datos, en función de las características de los móviles que la soportan, provo- cando, en muchos casos, desviaciones inaceptables dentro de los estudios de ruido. Los méto- dos colaborativos han aumentado su presencia en la literatura sobre el tema, sin embargo, la modelación geoespacial, mediante datos captados por dispositivos móviles, aún está en etapas muy tempranas de su desarrollo, esencialmente por la dependencia de la calidad del dato co- lectado, hacia la tecnología empleada.

Los métodos predictivos, empleados en la modelación geoespacial del ruido, se encuen- tran ampliamente abordados en la literatura. Estos métodos, parten de la determinación de un modelo de emisión y un modelo de propagación que, luego, son utilizados como motores de cálculo en software de modelación acústica. Se observa abundancia en el uso de métodos predictivos, debido, en parte, a la fiabilidad de los resultados, a la productividad de los traba- jos y a la posibilidad de usos diversos, en función de presentar un escenario acústico real o pronosticado. Una limitante encontrada, es la restricción del acceso a software especializado de cartografiado acústico más conocido, por ser de carácter comercial. También, el uso gene- ralizado de modelos de países desarrollados, hace que se obtengan en muchos casos resulta- dos divergentes de la situación acústica real, tras la aplicación en países donde las condiciones económicas, sociales y ambientales sean distintas.

En Cuba se evidencian algunos estudios basados tanto en métodos predictivos como en mediciones directas con desfase del tiempo, aunque estos no son muchos ni sistémicos.

CONCLUSIONES

Los métodos para la modelación geoespacial del ruido pueden ser clasificados en dos grandes grupos, estos son: métodos basados en mediciones directas y métodos basados en modelos de predicción.

La carencia o escasa implementación, de métodos de cálculos nacionales, en sistemas di- rigidos a la cartografía acústica propia, de muchos países, hace que los resultados obtenidos, en la mayoría de los estudios difieran de los valores acústicos reales.

A nivel global, predominan los métodos fundamentados en el uso de aplicaciones infor- máticas comerciales originales de países desarrollados.

Se observa una tendencia al uso de software de código abierto ante el incremento de la contaminación acústica dentro de países en vías de desarrollo.

La contaminación acústica se ha convertido en un fenómeno omnipresente en los proble- mas ambientales de los países desarrollados y en aquellos en vías de desarrollo, los cuales, al ser más vulnerables tecnológica y legislativamente, exponen a su población a mayores niveles de riesgo ante afectaciones por la contaminación acústica.

En Cuba, de acuerdo a la bibliografía encontrada, existen pocos estudios enfocados a mo- delar geoespacialmente el ruido por tráfico rodado y estos están orientados fundamentalmen- te a métodos con mediciones directas.

Como continuidad de este trabajo se puede explorar la efectividad de los diversos métodos de modelación geoespacial del ruido en las urbes cubanas. Se podrían enfocar trabajos hacia el objetivo de establecer un marco científico-técnico para monitorear, predecir y evaluar los niveles de contaminación sonora, dado que este es un problema presente en la sociedad cubana actual.

REFERENCIAS

Abramic, A., Kotsev, A., Cetl, V., Kephalopoulos, S., & Paviotti, M. (2017). A spatial data infras- tructure for environmental noise data in Europe. International journal of environmental research and public health, 14(7), 726.

Agudelo, Ó. A., Marín, C. M., & García, P. G. (2019). Condiciones de tránsito vehicular y uso de un modelo para la predicción de ruido por tráfico rodado en un entorno local de la ciu- dad de Bogotá-Colombia. Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação.

Alam, P., Ahmad, K., Afsar, S. S., & Akhtar, N. (2020). Noise Monitoring, Mapping, and Mo- delling Studies – A Review. Journal of Ecological Engineering, 21(4), 11.

Ali, S. M., Hama, A. R., & Ali, Y. M. (2017). A study of Land Zoning in the base of Traffic Noi- se Pollution Levels using ArcGIS: Kirkuk City as a Case Study. Al-Khwarizmi Engineering Journal, 13, 14.

Alías, F., & Alsina-Pagès, R. M. (2019). Review of Wireless Acoustic Sensor Networks for En- vironmental Noise Monitoring in Smart Cities. Hindawi. Journal of Sensors.

Alías, F., Alsina-Pagès, R. M., Socoró, J. C., & Orga, F. (2018). DYNAMAP: A low-cost wasn for real-time road traffic noise mapping. TecniAcustica Cadiz 2018.

Alías, F., & Socoró, J. C. (2017). Description of Anomalous Noise Events for Reliable Dynamic Traffic Noise mapping in Real-Life Urban and Suburban Soundscapes. applied sciences.

Alsina-Pagès, R. M., Orga, F., Alías, F., & Socoró, J. C. (2019). AWASN-Based Suburban Dataset for Anomalous Noise Event Detection on Dynamic Road-Traffic Noise mapping. Sensors.

Alva, J. N. A., & Diaz, G. F. E. (2019). Evaluación de la contaminación sonora en el distrito de La Esperanza, provincia de Trujillo durante el mes de marzo de 2019. Universidad Nacio- nal de Trujillo, Perú.

Arcos, F. M. A. (2018). Predicción de Ruido por Tráfico Vehicular y Elaboración del mapa de Ruido utilizando el Modelo HARMONOISE del Centro Histórico de Cuenca. (Trabajo de Grado), Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador.

Asensio, C., Pavón, I., Ramos, C., López, J. M., Pamiés, Y., Moreno, D., & de Arcas, G. (2021). Estimation of the noise emissions generated by a single vehicle while driving. Transporta- tion Research Part D, 95, 102865.

Bartalucci, C., Borchi, F., Carfagni, M., Furferi, R., Governi, L., Lapini, A., . . . Nencini, L. (2018). The smart noise monitoring system implemented in the frame of the Life MONZA project. Paper presented at the Proceedings of the EuroNoise.

Batura, K. P., & Waligórski, M. (2021). Methodological basis of road acoustic researches. Com- bustion Engines, 60.

Bello, J. P., Silva, C., Nov, O., Dubois, R. L., Arora, A., Salamon, J., . . . Doraiswamy, H. (2019). SONYC: A System for Monitoring, Analyzing, and Mitigating Urban Noise Pollution. Communications of the ACM, 62.

Bellucci, P., Peruzzi, L., & Zambon, G. (2016). LIFE DYNAMAP project: The case study of Rome. Applied Acoustics.

Benocci, R., Confalonieri, C., Roman, H. E., Angelini, F., & Zambon, G. (2020). Accuracy of the Dynamic Acoustic Map in a Large City Generated by Fixed Monitoring Units. Sensors.

Berger, M., & Bill, R. (2019). Combining VR Visualization and Sonification for Immersive Ex- ploration of Urban Noise Standards. Multimodal Technologies and Interaction.

Bilandzic, M., Banholzer, M., Peev, D., Georgiev, V., Balagtas-Fernandez, F., & Luca, A. D. (2008). Laermometer - A mobile noise mapping application.

Bilewu, S. O., Salami, A. W., Ayanshola, A. M., & Yusuf, I. T. (2019). Assessment of Noise from Transportation Systems in Ilorin, Nigeria. Nigerian Journal of Technological Development, 16.

Bocher, E., Guillaume, G., Picaut, J., Petit, G., & Fortin, N. (2019). NoiseModelling: An open source GIS based tool to produce environmental noise maps. Int. J. Geo-Inf. doi: 10.20944/ preprints201902.0087.v1

Bravo-Moncayo, L., Chávez, M., Puyan, V., Lucio-Naranjo, J., Garzón, C., & Pavón-García, I. (2019). A cost-effective approach to the evaluation of traffic noise exposure in the city of Quito, Ecuador. Case Studies on Transport Policy, 9.

Brito, L. A. P. F. d. (2017). A utilização de mapas acústicos como ferramenta de identificação do excesso de ruído em áreas urbanas. Eng Sanit Ambient, 22, 13.

Buhaug, H., & Urdal, H. (2013). An urbanization bomb? Population growth and social disor- der in cities. Global environmental change, 23(1), 1-10.

Cárdenas, J. P. G. E. E. F. P. (2012). Generación de un modelo de predicción de ruido aplicando técnicas geoestadísticas en las parroquias de San Rafael y Sangolquí del cantón Rumiñahui. (Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente), Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.

Castillo, G. C. (2019). Caracterización espacial del ruido ambiental generado por tráfico vehi- cular en el cercado de la ciudad de Juliaca. (Ingeniero Sanitario y Ambiental), Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez", Perú.

Cepeda, R. S., & Garzón, J. A. G. (2011). Diseño de un mapa de ruido ambiental para la zona centro del municipio de Bucaramanga. (Ingeniero Ambiental), Universidad Pontificia Bo- livariana, Colombia.

Chappa, A. R. (2021). Evaluación de los niveles sonoros generados por el parque automotor en el centro urbano, Chachapoyas, Perú. Revista de Investigación Científica UNTRM: Cien- cias Naturales e Ingeniería, 4, 25--29.

Clark, C., & Paunovic, K. (2018). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Quality of Life,Wellbeing and Mental Health. International Journal of Enviromental Research and Public Health.

Contreras, V. C. (2019). Implicancia de la contaminación estruendosa en el exterior de la Uni- versidad Nacional Pedro Ruiz Gallo-Chiclayo. (Doctorado), Universidad Nacional Federi- co Villarreal, Perú.

Delgado, O., & Meartínez, J. (2015). Elaboración del mapa de ruido del área urbana de la Ciu- dad de Cuenca – Ecuador, empleando la técnica de interpolación geoestadística Kriging ordinario. Revista Ciencias Espaciales, 8.

Delgado, R. (2022). Fotografía oblicua para la ciudad digital, avances en Asia. .

Faulkner, J.-P., & Murphy, E. (2022). Road traffic noise modelling and population exposure es- timation using CNOSSOS-EU: Insights from Ireland. Applied Acoustics, 192, 108692.

Fecht, D., Hansell, A., Morley, D., Dajnak, D., Vienneau, D., Beevers, S., . . . Kelly, F. J. (2016). Spatial and temporal associations of road traffic noise and air pollution in London: Impli- cations for epidemiological studies. Environment International, 7.

Flórez, M. A., Mosuqera, J., Ramón, J. D., & Caballero, J. E. (2019). Análisis de la contamina- ción de ruido generada por el flujo vehicular en el casco urbano del municipio de Chiná- cota, Norte de Santander. Revista ambiental agua, aire y suelo, 2.

Gómez, D. M. M. (2017, Enero-Junio 2017). Resolución espacial en la elaboración de mapas de ruido por interpolación. Ingenierías USBMed, 8.

González-Lozano, R., & Betancourt, H. T. (2018). Procedimiento para la creación de mapas sonométricos a grandes escalas sobre plataformas SIG. X Congreso Internacional de Geo- mática 2018.

Graziuso, G., Grimaldi, M., Mancini, S., Quartieri, J., & Guarnaccia, C. (2020). Crowdsour- cing Data for the Elaboration of Noise maps: a Methodological Proposal. Journal of Phy- sics: Conference Series. doi: 10.1088/1742-6596/1603/1/012030

Grubeša, S., Petošić, A., Suhanek, M., & Đurek, I. (2018). Mobile crowdsensing accuracy for noise mapping in smart cities. Automatika, 59, 7.

Gulliver, J., Morley, D., Vienneau, D., Fabbri, F., Bell, M., Goodman, P., . . . Fecht, D. (2015). Development of an open-source road traffic noise model for exposure assessment. Envi- ronmental Modelling & Software, 10.

Gutiérrez, C. D. (2019). Estrategias para la adquisición de información asociada a tráfico ve- hicular y su aplicación en mapas de ruido. (Trabajo de Grado), Universidad de San Buena- ventura Colombia, Colombia.

Hipólito, J. H. J., Moreno-Ibarra, M., & Torres-Ruiz, M. (2017). Monitoreo colaborativo del ruido ambiental utilizando dispositivos móviles y Sistemas de Información Geográfica.

Iglesias Merchan, C., Laborda Somolinos, R., González Ávila, S., & Elena Rosselló, R. (2021). Spatio-temporal changes of road traffic noise pollution at ecoregional scale. Environmen- tal Pollution, 286, 117291.

Ivanović, L., & Ho, Y.-S. (2019). Highly cited articles in the Education and Educational Re- search category in the Social Science Citation Index: a bibliometric analysis. Educational Review, 71, 277-286. doi: 10.1080/00131911.2017.1415297

Jácobo, L. A. R., García, M. T. R., Zare, E. J. G., & Centeno, E. I. (2020). Mapa geoestadístico de los niveles de ruido en el centro histórico de Trujillo, 2019. Revista Investigación Esta- dística, 3, 77--89.

Jirka, S., Bröring, A., Kjeld, P. C., Maidens, J., & Wytzisk, A. (2012). A Lightweight Approach for the Sensor Observation Service to Share Environmental Data Across Europe. Transac- tions in GIS.

Kanjo, E. (2010). NoiseSPY: A Real-Time Mobile Phone Platform for Urban Noise Monitoring and Mapping. Mobile Networks and Applications.

Karolus, J. (2013). Creating noise pollution maps based on user-generated noise measurements.

Kumar, K., Ledoux, H., Commandeur, T. J. F., & Stoter, J. E. (2017). Modelling urban noise in CITYGML ade: Case of the Netherlands. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

Kumar, K., Ledoux, H., Schmidt, R., Verheij, T., & Stoter, J. (2020). A Harmonized Data Model for Noise Simulation in the EU. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9.

López-Quílez, A., & Muñoz#, F. (2009). Geostatistical computing of acoustic maps in the pre- sence of barriers. Mathematical and Computer Modelling.

Lopez, G. A. P., & Souza, L. C. L. d. (2020). Comparison of mathematical methods and measu- rements of traffic noise indices in pedestrian routes. Ambiente Construído, 20, 351--364.

Lozano, R. G., & Betancourt, H. T. (2018). Procedimiento para la creación de mapas sonomé- tricos a grandes escalas sobre plataformas SIG. X Congreso Internacional de Geomática 2018.

Luque, J. H. V. (2019). Análisis y evaluación de la situación actual del ruido ambiental y la per- cepción de molestia de los habitantes de la ciudad de Juliaca. (Ingeniero Sanitario y Am- biental), Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez", Perú.

Maguire, D. J., & Longley, P. A. (2005). The emergence of geoportals and their role in spatial data infrastructures. Computers, environment and urban systems, 29(1), 3-14.

Maisonneuve, N., Stevens, M., Niessen, M. E., & Steels, L. (2009). NoiseTube: Measuring and mapping noise pollution with mobile phones. Information Technologies in Environmental Engineering.

Maman, G. M., Paucara, E. M., Espinoza, J. N. N., Maman, V. E., & Pérez, F. C. (2021). Mode- lamiento kriging del comportamiento vertical de ruido ambiental mediante mapas temá- ticos durante festividades culturales en Puno y Juliaca, Perú. Tecnología en Marcha, 34(3), 3-14.

Mamani, G. M., Paucara, E. M., Vilca, R. A. L., Espinoza, N. B., & Pérez, F. C. (2019). Modela- miento kriging para mapas acústicos de las festividades culturales de la Región de Puno: Estudio del caso. Campus, XXIV, 69--76.

Manojkumar, N., Basha, K., & Srimuruganandam, B. (2019). Assessment, Prediction andMa- pping of Noise Levels in Vellore City, India. Noise mapp.

Martín, I. L. R., & Mateo, R. A. R. D. (2021). Mapa de ruido ambiental entre la avenida Mira- flores y la avenida Manuel Prado en el distrito de Carabayllo, provincia y departamento de Lima- 2021. Universidad César Vallejo, Perú.

Mazarías, G. G. (2019). Acústica Ambiental: Investigación sobre el ruido ambiental en el Cen- tro Histórico de Gandia. (Trabajo de Grado), Universidad Politécnica de Valencia, España.

Mendoza, P. A. H. (2021). Analisis del modelo estadístico predictivo de ruido ambiental urba- no a partir del método lineal y multivariante en el sector norte de Quito de Coral y et al para su validación en 2021., Universidad Internacional Sek.

Mietlicki, C., & Mietlicki, F. (2018). Medusa: A new approach for noise management and con- trol in urban environment. Paper presented at the Proceedings of the EuroNoise.

Mietlicki, F., Mietlicki, C., & Sineau, M. (2015). An Innovative Approach for long term envi- ronmental noise measurement: RUMEUR Network in the Paris Region. Paper presented at the Proceedings of the EuroNoise.

Mohsin, M., Abbas, Q., Zhang, J., Ikram, M., & Iqbal, N. (2019). Integrated effect of energy consumption, economic development, and population growth on CO 2 based environ- mental degradation: a case of transport sector. Environmental Science and Pollution Re- search, 26(32), 32824-32835.

Moncayo, L. B. (2017). Valoración económica contingente del ruido de tráfico rodado median- te redes neuronales artificiales. Universidad Politécnica de Madrid, España.

Münzel, T., Schmidt, F. P., Steven, S., Herzog, J., & Daiber, A. (2018). Environmental Noise and the Cardiovascular System. Journal of the American College of Cardiology, 71.

Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J. D., Pardo, A., & Rendón, J. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos.

Murphy, E., & King, E. (2016). Testing the accuracy of smartphones and sound level meter applications for measuring environmental noise. Applied Acoustics, 6.

Nedovic-Budic, Z., Crompvoets, J., & Georgiadou, Y. (2011). Spatial data infrastructures in context: North and South: CRC Press.

Neitzel, R. (2018). Chronic health effects and injury associated with environmental noise po- llution.

Nourani, V., Gökçekuş, H., & Umar, I. K. (2020). Artificial intelligence based ensemble model for prediction of vehicular traffic noise. Environmental Research, 180, 108852.

Oiamo, T. H., Davies, H., & Rinner, C. (2017). Environmental Noise Study in the City of To- ronto.

Olayinka Oyedepo, S., Adewale Adeyemi, G., C Olawole , O., I Ohijeagbon, O., K Fagbemi, O., Solomon, R., . . . N Nwaokocha, C. (2019). A GIS--based method for assessment and map- ping of noise pollution in Ota metropolis, Nigeria. MethodsX, 6, 10.

Orellana, F. V. (2014). Hacia una definición de los indicadores de la calidad sonora del ambiente exterior y su aplicación al SIG, casos: El ensanche de Barcelona y Vilnius. (Doctorado en Co- municación Visual en Arquitectura y Diseño), Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Pérez, C. B., Alonso, O. B., Sánchez, Y. G., Leonard, A. R., Rojas, V. E., & Alayón, J. L. (2015). Caracterización del nivel sonoro del tráfico en las ciudades de La Habana. Pinar del Río y Santiago de Cuba. 2013 – 14. Convención Internacional de Salud. Cuba Salud 2015.

Pérez, I. F., Mendoza, O., Hermida, L. F., & Herrera, M. (2020). Sustainable Acoustics: A Smart Cities approach. Tecciencia, 15(29), 39-52. doi: http://dx.doi.org/10.18180/teccien- cia.2020.29.5

Pérez, L. A. S. (2011). Modelo computacional para generar un mapa de ruido ambiental uti- lizando mediciones en tiempo real. (Maestro en Ciencias de la Computación), Institu- to Politécnico Nacional, México. Retrieved from http://repositoriodigital.ipn.mx/hand- le/123456789/5677

Piñeiro, R. G., & Pérez, C. B. (2006). Estimación de la contaminación sonora del tránsito en Ciudad de La Habana.

Ponze Cateriano, D. J., & Sierra Sacasqui, G. (2020). Elaboración de un mapa de ruidos para la identificación de los puntos críticos de la contaminación sonora en el centro histórico del distrito de Yanahuara. (Ingeniero Ambiental Ingeniería), Universidad Católica de Santa María, Perú.

Rainham, D. (2016). A wireless sensor network for urban environmental health monitoring: UrbanSense. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Rana, R. K., Chou, C. T., Bulusu, N., Hu, W., & Kanhere, S. (2009). Ear-Phone: An End-to-End Participatory Urban Noise mapping System. Australia.

Remond, J. M. D. (2012). Diagnóstico y modelación tridimensional de la relación zona resi- dencial – microclima acústico. Caso de estudio "Reparto Escambray". Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

Rincón, A. V. d., & Ruiz, D. M. (2016). Modelos de previsión de ruido. Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente., XIV.

Rodrigues, R. C. (2020). Traffic noise and energy. Energy Reports, 6.

Rojas, J. C. (2019). Mapa estratégico de ruido ambiental en la zona urbana de Puno - año 2018. Universidad Nacional del Altiplano, Perú.

Ryua, H., Park, I. K., Chunc, B. S., & Chang, S. I. (2017). Spatial statistical analysis of the effects of ur- ban form indicators on road-traffic noise exposure of a city in South Korea. Applied Acoustics, 7.

Salameh, A. (2010). La contaminación acústica urbana y su influencia en la calidad del hábitad en la ciudad de Santa Clara. . Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

Schweizer, I., Bartl, R., Schulz, A., & Probst, F. (2011). NoiseMap - Real-time participatory noi- se maps.

Sevillano, X., Socoró, J. C., Alías, F., Bellucci, P., Peruzzi, L., Radaelli, S., . . . Zambon, G. (2016). DYNAMAP – Development of low cost sensors networks for real time noise mapping. NoiseMapp.

Silva, V. L., & Guevara, M. S. S. (2019). Análisis y evaluación del ruido ambiental generado por los establecimientos nocturnos en los barrios El Samán y La Independencia del municipio de Acacías, departamento del Meta, Colombia. (Ingeniero Ambiental), Universidad Santo Tomás, Colombia.

Sotolongo, D. E. T., & Suárez, P. R. (2014). Procedimiento para la evaluación del ruido ambien- tal urbano en el municipio de Regla (Cuba) utilizando Sistemas de Información Geográfi- ca Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, 15.

Suárez, P. M. (2015). El ambiente acústico urbano en Madrid: Análisis espacio-temporal y afección potencial sobre población y equipamientos sensibles. (Tesis Doctoral), España.

Torres, F. O. C. (2021). Contaminación sonora en la zona urbana del distrito de Chulucanas, provincia de Morropón, región Piura, año 2020. (Ingeniero Ambiental), Universidad Catól- lica Sedes Sapientiae, Perú.

Tortosa, D. D., Mora, J. A. M., & Quintanilla, C. L. (2017). Comparación de mapas de ruido obtenidos con software libre (opeNoise v0.3.1) y comercial (Predictor-LimA v11.10). Tec- niAcustica A Coruña 2017.

Valdez, A. M. M., & Aquino, M. M. (2020). Contaminación acústica y su percepción ambien- tal en la comunidad educativa del cercado de Tacna, 2019. Ingeniería Investiga

Villacreses, J., Munizaga, L., & V, W. V. (2016). Sistema integral para el monitoreo y control de los sonidos en bares y zonas céntricas de la ciudad en tiempo real. Revista Tecnológica ESPOL.

Villegas, J. O., Orozco, J. S. M., & Jiménez, L. A. T. (2017). Alternativas para la Adquisición de Datos Colaborativos Necesarios en la Construcción de Mapas de Ruido de Trafico Auto- motor. Ing.USBMed, 8.

Villena, A. C. (2018). Contaminación sonora vehicular en los distritos de Cusco, Wanchaq y San Sebastián de la provincia de Cusco. (Doctoris Scientiae en Ciencia, Tecnología y Me- dio Ambiente Doctorado), Universidad Nacional del Altiplano, Perú.

Zambon, G., Roman, H. E., Smiraglia, M., & Benocci, R. (2018). Monitoring and Prediction of Traffic Noise in Large Urban Areas. applied sciences.

Zhang, X., Zhao, M., & Dong, R. (2020). Time-Series Prediction of Environmental Noise for Urban IoT Based on Long Short-Term Memory Recurrent Neural Network. applied scien- ces. doi: 10.3390/app10031144

Zhao, W.-J., Liu, E.-X., Poh, H. J., Wang, B., Gao, S.-P., Png, C. E., . . . Chong, S. H. (2017). 3D traffic noise mapping using unstructured surface mesh representation of buildings and roads. Applied Acoustics.