

**MODELADO GEOESPACIAL DEL NIVEL SONORO URBANO PRODUCIDO POR
TRÁFICO RODADO EN LA CIUDAD DE SANTA CLARA.**

**GEOSPATIAL MODELING OF THE URBAN SOUND LEVEL PRODUCED BY ROAD
TRAFFIC IN THE CITY OF SANTA CLARA.**

Raúl González Lozano¹
Silvio Vioel Rodríguez Hernández²

1 Empresa GEOCUBA GEODESA rglozano@vcl.geocuba.cu

2 Unidad Científico Técnica GEOCUBA de Investigación y Consultoría silvio@uct.geocuba.cu

Resumen

El modelado geoespacial de los niveles sonoros que afectan una zona geográfica, constituye una tarea sumamente compleja dada la naturaleza del sonido como fenómeno físico. La aplicación de técnicas geomáticas, contribuyen a la predicción confiable de los niveles sonoros a escala urbana, mediante la interpretación de las características geoespaciales de la zona de estudio. El presente trabajo, persigue como objetivo general, modelar geoespacialmente el nivel sonoro producido por el tráfico rodado en la zona interior a la carretera circunvalante de la ciudad de Santa Clara, provincia Villa Clara, Cuba. Para ello, se emplean datos geoespaciales fundamentales y temáticos del área de estudio y se consideran variables relativas al tráfico vehicular. Los algoritmos necesarios para arribar a los resultados esperados se ejecutan sobre el Sistema de Información Geográfica QGIS, mediante el desarrollo de un complemento al software para el modelado sonoro. Como conclusiones del estudio, se observan elevados y generalizados niveles de presión sonora que comprometen la calidad ambiental de la zona de la ciudad sometida a análisis. También se aprecia que casi la totalidad de la población fija de la zona de estudio radica en locaciones donde el nivel límite tolerable para urbanizaciones, de acuerdo a la NC: 26-2012, es superado, en detrimento de las condiciones de calidad de vida.

Abstract

The geospatial modeling of sound levels that affect a geographical area is an extremely complex task given the nature of sound as a physical phenomenon. The application of geomatic techniques contributes to the reliable prediction of noise levels on an urban scale, through the interpretation of the geospatial characteristics of the study area. The present work pursues as a general objective, to geospatially model the noise level produced by road traffic in the area inside the ring road of the city of Santa Clara, Villa Clara province, Cuba. For this, fundamental and thematic geospatial data of the study area are used and variables related to vehicular traffic are considered. The algorithms necessary to arrive at the expected results are executed on the Geographic Information System QGIS, through the development of a complement to the software for sound modeling. As conclusions of the study, high and generalized levels of sound pressure are observed that compromise the environmental quality of the area of the city subjected to analysis. It can also be seen that almost the entire fixed population of the study area lives in locations where the tolerable limit level for urbanizations, according to NC: 26-2012, is exceeded, to the detriment of quality of life conditions.

Palabras claves: contaminación acústica; estimación; modelado geoespacial; ruido de tráfico rodado

Keywords: estimation; geospatial modeling; noise pollution; road traffic noise

Recibido: 22/08/2022

Aprobado: 10/11/2022

Introducción

El ruido, a diferencia de otras formas de contaminación, no deja residuos, una vez interrumpida la emisión, desaparece rápidamente. Si bien el ruido podría provocar, potencialmente, efectos materiales, a los niveles que generalmente prevalecen en el medio urbano, ello no sucede. Además, debido a que durante el proceso de propagación la energía sonora se disipa transformándose en minúsculas cantidades de calor (energía térmica), su incidencia es inherentemente local. Aunque estas particularidades harían suponer que el ruido no tiene un impacto decisivo sobre el ambiente, la realidad es otra. Debido a la creciente multiplicidad de fuentes y a su capacidad de interferir con las actividades humanas, el ruido se convierte en una seria amenaza para la calidad de vida. Muchos de sus efectos son, de hecho, acumulativos, y no desaparecen de inmediato cuando se interrumpe la exposición. En algunos casos, como el de la disminución de la capacidad auditiva, sus efectos son irreversibles Miyara.

Por las razones antes expuestas, la comunidad científica desarrolla esfuerzos con el fin de evaluar el nivel sonoro proveniente de distintas fuentes en los espacios geográficos, fundamentalmente del ruido urbano producido por el transporte automotor. Entre estos esfuerzos, están aquellos que se basan en el modelado geoespacial del fenómeno y que permiten conocer el comportamiento esperado bajo distintas condiciones de emisión y propagación.

La estimación geoespacial de los niveles sonoros, constituye una tarea sumamente compleja dada la naturaleza de este fenómeno físico. La aplicación de técnicas de la Geomática, contribuye a la predicción confiable de los niveles sonoros en el medio urbano, mediante la interpretación de las características geoespaciales de la zona de estudio.

El presente estudio, persigue como objetivo general, estimar el nivel sonoro producido por el tráfico automotor en la zona interior a la carretera circunvalante de la ciudad de Santa Clara, en lo adelante, zona de estudio. Para ello, se emplean datos geoespaciales fundamentales y temáticos del área de estudio y se consideran variables relativas al tráfico vehicular. Como método de trabajo, se realiza el modelado geoespacial del fenómeno estudiado. Los algoritmos necesarios para arribar a los resultados deseados se ejecutan sobre el Sistema de Información Geográfica QGIS. Un elemento fundamental, dentro del flujo de trabajo, lo constituyó el desarrollo de un complemento (*plugging*) a dicho software para el modelado geoespacial sonoro.

Finalmente, se observan elevados y generalizados niveles de presión sonora que comprometen la calidad ambiental y afectan a la población, pues casi la totalidad de habitantes fijos está en lugares donde se supera el nivel tolerable de 65 decibeles (dB) para urbanizaciones de acuerdo a los límites establecido por la NC: 26-2012 “Ruido en zonas habitables – Requisitos higiénicos sanitarios” (NC (2012)), en lo adelante, norma de referencia.

Metodología.

En el desarrollo del presente estudio, se empleó una serie de materiales y datos que permitieron realizar las operaciones geoespaciales necesarias para estimar el nivel sonoro urbano en el área de estudio. Los mismos se relacionan a continuación:

- Datos geoespaciales vectoriales en formato SHP, con los viales, las construcciones, los consejos populares, las manzanas y otros. (Fuente: Empresa GEOCUBA Villa Clara Sancti Spíritus).
- Modelo Digital de Superficie en formato TIFF, de la ciudad de Santa Clara, generado por métodos fotogramétricos. (Fuente: Empresa GEOCUBA Geodesa).

- Ortoimagen a 5 cm resolución espacial de la ciudad de Santa Clara. (Fuente: Empresa GEOCUBA Geodesa).
- Estudios sobre aforo vehicular realizados por la Facultad de Construcciones de la Universidad Central de Las Villas “Marta Abreus”.

Los datos utilizados durante la aplicación del método propuesto se pueden dividir en dos grupos: los datos fundamentales y los datos temáticos. De acuerdo con Hernández (2013) los datos fundamentales constituyen los datos geográficos más utilizados por los usuarios para diversas aplicaciones. En este caso, se consideran los siguientes:

- Límite del municipio de Santa Clara.
- Límite de la zona urbana de Santa Clara.
- Manzanas de la zona de estudio.

Los datos temáticos tienen un uso específico orientado a una temática o disciplina. En este caso se consideran los siguientes:

- Construcciones.
- Viales con atributos característicos del tráfico.

El método empleado en el estudio (Fig.1), se basa en el modelado geoespacial de los niveles sonoros sobre un Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante la elaboración de algoritmos geoespaciales que permiten modelar el comportamiento del ruido a partir de los modelos matemáticos existente a tales fines (Lozano y Trujillo (2022)).

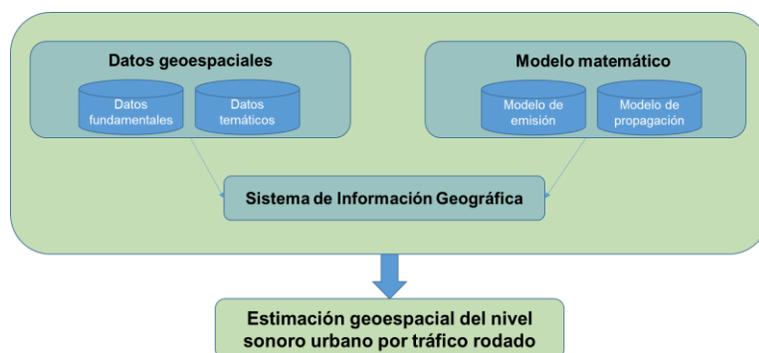


Figura 1. Esquema general para el modelado geoespacial del nivel de sonoro urbano por tráfico rodado.

En la literatura especializada abundan los estudios sobre el desarrollo de modelos matemáticos enfocados para estimar el nivel sonoro en función de variables del tráfico y del medio geográfico circundante (Álvarez y Granja (2012)), (Arana, Vírgala, Aleixandre, Martín, y Vela (2000)), (Arcos (2018)), (Azzurro, Ercoli, y Namuz (2000)), (Bastián, Álvarez, y Morenoc (2014)), (Cárdenas (2012)), (Domínguez, Sánchez, y Gutiérrez (2009)), (Echeverry, Ochoa, y Fernández (2008)), (Fuentes, García, Cepeda, Búrdalo, y Barrios (2008)), (García (2009)), (Miyara (S.F)),

(Monarca, Rodenbeek, Silva, y Montenegro (2015)), (Quintero, Frias, y Henríquez (2018)), (Rincón y Ruiz (2016)), (Rodenbeek y Silva (2011)), (Pujad, Sánchez y Arias (2010)), (Vicente (2014)). La mayoría de los modelos, coinciden en dividir el modelado en dos componentes: un modelo de emisión que tiene en cuenta las características de la fuente y un modelo de propagación que considera las características del medio, planteándose una relación del tipo:

$$L_{Aeq} = L_{emis.} + At_{propag.}$$

Donde:

L_{Aeq} : es el nivel sonoro equivalente continuo estimado.

$L_{emis.}$: constituye el nivel en la fuente calculado por el modelo de emisión.

$At_{propag.}$: constituye el valor de la atenuación calculada por el modelo de propagación.

El modelo matemático se implementó sobre QGIS mediante un complemento (*plugging*) a dicho software.

La estimación de los niveles sonoros, se realizó en una serie de puntos receptores creados en toda la zona de estudio, mediante el modelado geoespacial del comportamiento del ruido, a partir de la interpretación espacial del modelo matemático durante la emisión y la propagación y su combinación con algoritmos geoespaciales que implementan, mediante la teoría geométrica de rayos, los fenómenos fundamentales ocurridos durante la propagación del sonido: rayos directos (Fig. 2-B), reflejados (Fig. 2-A) y difractados (Fig. 2-C).

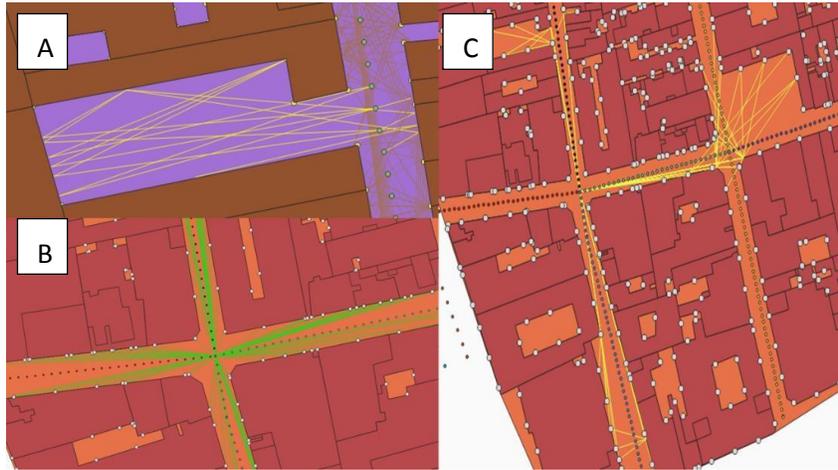


Figura 2. Modelado geoespacial mediante de diferentes fenómenos acústicos durante la propagación del sonido.

Resultados y discusión.

Se realizó el cálculo de los niveles sonoros en cada punto receptor, situado en los alrededores de las manzanas, en la zona de estudio, a partir del método propuesto, obteniéndose el resultado que se muestra en la (Fig. 3).

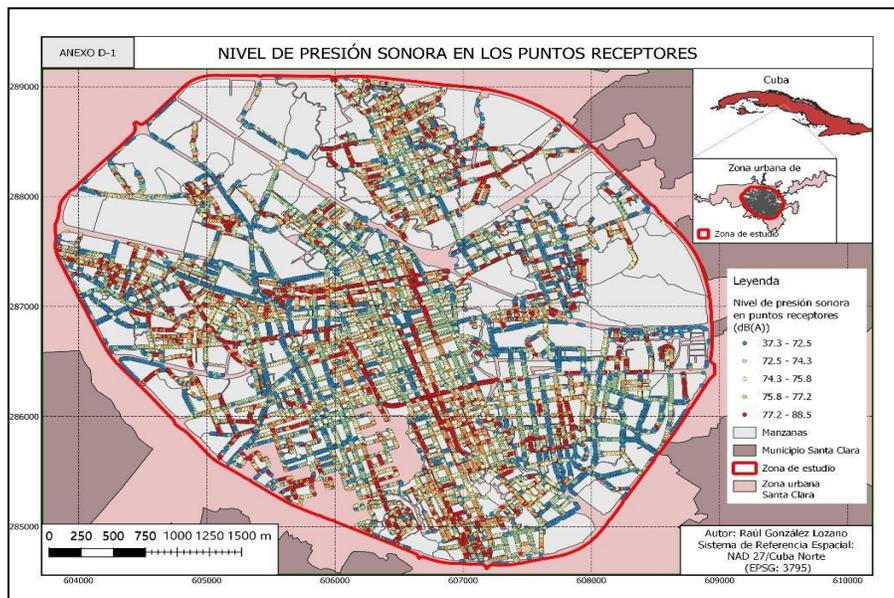


Figura 3. Mapa de los niveles de presión sonora calculada en los puntos receptores.

Para ello se crearon **35749** puntos receptores con **10 m** de separación entre ellos y a una distancia de **0.1m** de la fachada de las manzanas, considerando que todas estaban completamente construidas.

Para evaluar la calidad de las estimaciones realizadas en los puntos receptores, se calculó el Error Medio Cuadrático (EMC) arrojado por el modelado respecto a los valores del nivel de presión sonora medidos directamente en campo con un sonómetro integrador clase 1 (Sonómetro profesional PCE-430). El cálculo del tamaño de la muestra se realiza bajo el criterio de garantizar que el error medio cuadrático muestral caracterice con un **95 %** de confianza el error medio cuadrático de la población. Para ello, si se considera $N = 35749$, $Z = 1.96$, $p = q = 0.05$ y $e = 3.72\%$, entonces el tamaño de la muestra calculado es $n = 681$ puntos de

El cálculo del EMC arroja un valor de $\pm 2,76dB$. Este valor está en el rango de los $\pm 3dB$, establecido en la norma de referencia, lo cual valida la calidad de la estimación del nivel de presión sonora realizada.

La norma de referencia establece los niveles máximos admisibles y tolerables (NMA y NT respectivamente) en zonas habitables, tanto en el interior de la vivienda como en las áreas urbanizadas aledañas. De acuerdo a estos límites, el valor del NT, en el período diurno, para áreas urbanizadas estables, producido por el tráfico rodado, es de **68dB**. Por concepto de área se puede plantear que aproximadamente el **87%** de la zona de estudio se encuentra bajo un ambiente contaminado acústicamente (Fig. 4).

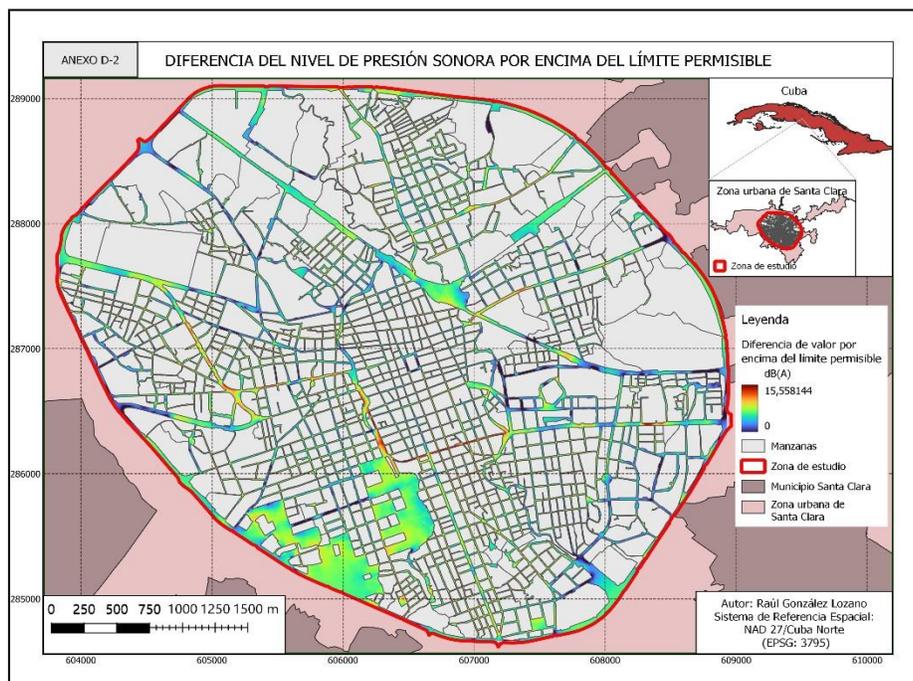


Figura 4. Área que incumple los NT según la norma de referencia. Fuente: (Elaboración propia)

Para obtener el mapa de peligro por contaminación sonora, a cada manzana le es asignado el máximo valor del nivel de presión sonora calculado en los puntos receptores cerca de su frontera y

se expresa este valor en una escala de valores normalizados entre 1 y 10 unidades (fig.5). En el mapa elaborado se observa una manzana con valores de peligro comprendidos entre 1 y 2.8, dos manzanas con valores entre 2.8 y 4.6, 87 manzanas con valores entre 4.6 y 6.4, 991 manzanas entre 6.4 y 8.2 y 34 manzanas con valores entre 8.2 y 10. Según datos del Censo de Población y Vivienda del año 2012, el **74%** de la población (114589 habitantes) vive sometida a un ambiente acústico deteriorado con niveles entre **69dB** y **78dB** y un **24%** (37516 habitantes) vive en espacios sometidos a niveles máximos superiores a los **78dB**.

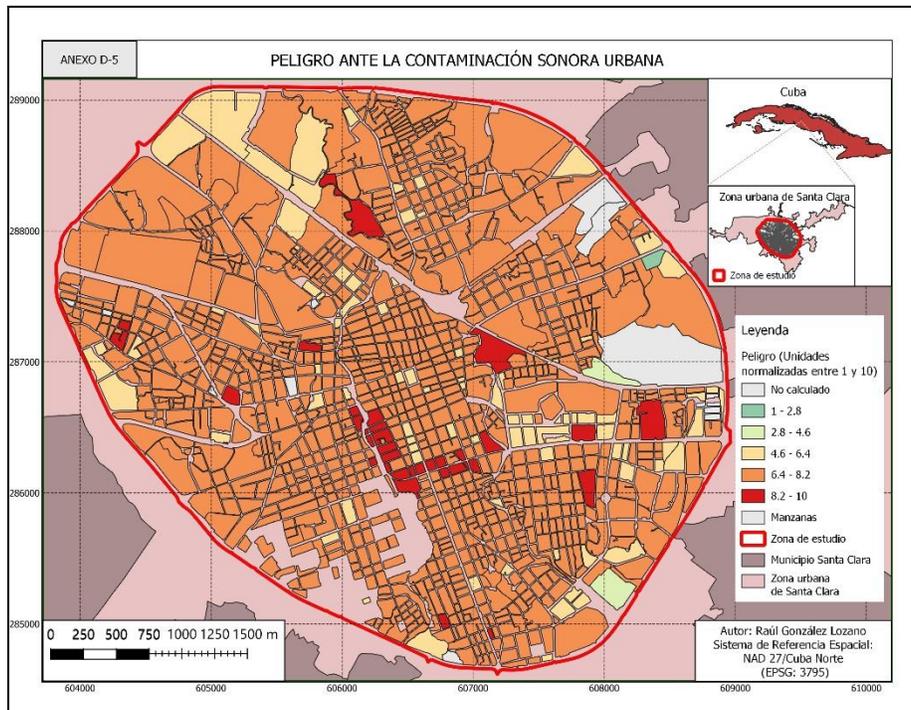


Figura 5. Mapa de peligro por contaminación acústica en la zona de estudio. Fuente: (Elaboración propia)

Por cada manzana se realiza un cálculo de la vulnerabilidad general ante la contaminación sonora mediante la aplicación de una metodología de Evaluación Espacial Multicriterio, fundamentada en el Proceso Analítico Jerárquico, obteniéndose la matriz de importancia relativa de cada uno de los criterios (Tabla 1). La selección de los criterios fue realizada bajo la consideración de incorporar diferentes aspectos de la vulnerabilidad (social e institucional).

Tabla 1: Matriz de importancia relativa de cada uno de los criterios empleados en el análisis de la vulnerabilidad. Fuente: (Elaboración propia)

	INSTITUCIONES DOCENTES	INSTITUCIONES DE SALUD	INSTITUCIONES DE INTERÉS	INSTITUCIONES CIENTÍFICAS Y/O TÉCNICAS	CANTIDAD DE NIÑOS	DENSIDAD POBLACION	CANTIDAD DE ANCIANOS	SUMA	PESOS	PESOS CADA VARIABLE * SUMA DE VARIABLE
INSTITUCIONES DOCENTES	1.000	0.840	1.139	0.926	1.040	0.820	1.005	6.769	0.137	0.930
INSTITUCIONES DE SALUD	1.190	1.000	1.250	1.042	1.075	0.952	1.058	7.568	0.154	1.162
INSTITUCIONES DE INTERÉS	0.878	0.800	1.000	0.847	0.990	0.775	0.976	6.266	0.127	0.797
INSTITUCIONES CIENTÍFICAS Y/O TÉCNICAS	1.080	0.960	1.180	1.000	1.042	0.901	1.026	7.188	0.146	1.049
CANTIDAD DE NIÑOS	0.962	0.930	1.010	0.960	1.000	0.893	0.995	6.750	0.137	0.925
DENSIDAD POBLACION	1.220	1.050	1.290	1.110	1.120	1.000	0.995	7.785	0.158	1.230
CANTIDAD DE ANCIANOS	0.995	0.945	1.025	0.975	1.005	1.005	1.000	6.950	0.141	0.980
SUMA	7.325	6.525	7.894	6.860	7.272	6.346	7.055	49.276	1.000	7.072
n	7									
IR	1.3200									
						λ (Lambda)	IC	RC		1
						7.0723	0.0121	0.0091		

Obtenidos los resultados de la vulnerabilidad por unidad espacial de análisis, se realizó una reclasificación en cinco clases obteniéndose el mapa de vulnerabilidad general ante la contaminación sonora que se muestra en la (Fig. 6).

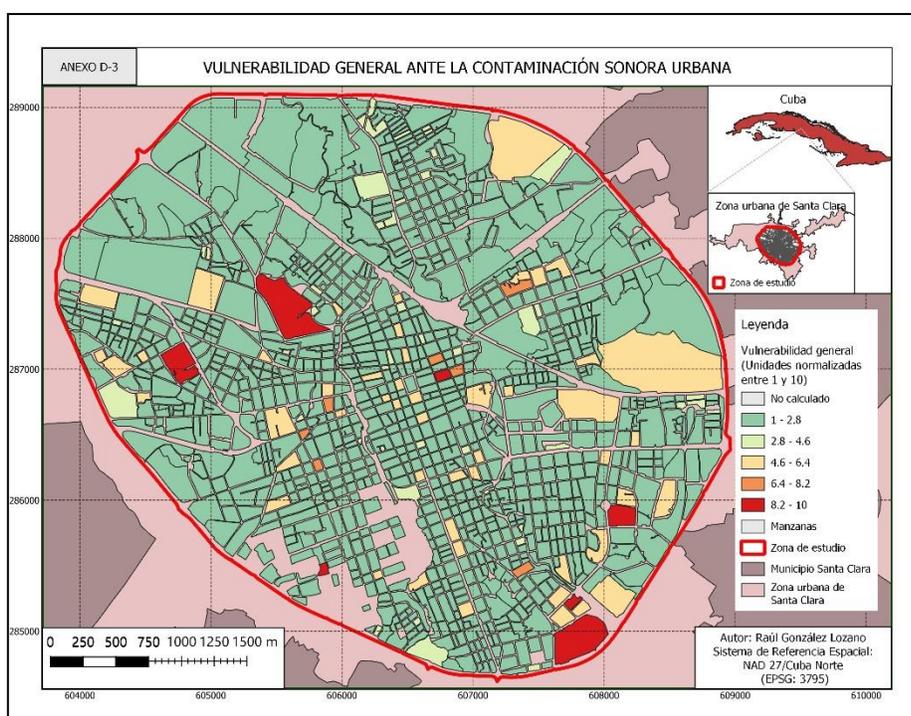


Figura 6. Mapa de vulnerabilidad general ante la contaminación sonora en la zona de estudio. Fuente: (Elaboración propia)

En el mapa de la (Fig 6) se observa un total de 1018 manzanas con niveles de vulnerabilidad comprendidos entre 1 y 2.8, 46 manzanas con valores entre 2.8 y 4.6, 51 manzanas con valores entre 4.6 y 6.4, 7 manzanas entre 6.4 y 8.2 y otras 7 manzanas con valores entre 8.2 y 10. Los valores de vulnerabilidad fueron normalizados a una escala de medición entre 1 y 10 unidades para poder hacerlos operables con los valores de peligro previamente normalizados. Se observa que los mayores niveles de vulnerabilidad se agrupan en el sector comprendido entre el punto extremo oeste, el centro y el punto extremo sur de la zona de estudio. Este hecho responde a la alta

concentración de centros sanitarios y docentes existente, así como a la presencia de las manzanas con mayor densidad de población en el área de estudio.

Mediante la combinación del peligro con la vulnerabilidad general se obtiene el mapa de riesgo ante la contaminación sonora por tráfico rodado en la zona de estudio.

Como dato relevante se puede observar un agrupamiento de las manzanas con alto riesgo por contaminación sonora alrededor de la carretera central. Este hecho está dado por los altos niveles de ruido producido por esta vía urbana. De manera general, la afectación mayor se observa en el sector comprendido entre el oeste y el sur de la zona de estudio. En esta área se concentra una gran cantidad de instituciones altamente vulnerables (centros sanitarios, centros docentes, etc.), que, en conjugación con los altos niveles característicos, en la zona de estudio, favorecen la existencia de altos niveles de riesgos en el sector.

Conclusiones

En la mayoría de la zona de estudio se estimaron niveles de presión sonora que transgreden los valores tolerables establecidos por la NC 26:2012.

El **87%** de la población en la zona de estudio se encuentra expuesto a niveles de ruidos superiores a **68dB**, lo cual constituye el límite tolerable en zonas urbanizadas de acuerdo a la norma de referencia.

La estimación de niveles sonoros producidos por el tráfico rodado a partir del modelado geoespacial en el presente estudio se realizó con un error medio cuadrático total inferior a los **3dB** garantizando la exactitud exigida en la NC 26:2012.

Los mayores niveles de riesgo por contaminación sonora se encuentran concentrados en el sector comprendido entre el punto extremo oeste, el centro y el punto extremo sur de la zona de estudio debido a la combinación de altos niveles de presión sonora y la alta concentración de centros sanitarios, docentes y manzanas con elevada densidad de población.

Referencias bibliográficas

- (NC), O. N. d. N. (2012). NC 26: 2012 Ruidos en zonas habitables — Requisitos higiénicos sanitarios. Cuba.
- Álvarez, G. F. G., & Granja, M. I. L. (2012). Desarrollo de una metodología para la ejecución de modelos matemáticos de atenuación de ruido, en medio atmosférico, para fuentes industriales fijas simples o complejas. (Ingeniero Ambiental), Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.

- Arana, M., Vír gala, A. M. d., Aleixandre, A., Martín, M. L. S., & Vela, A. (2000). Modelos de predicción del ruido de tráfico rodado. Comparación de diferentes standards europeos. TecniAcustica Madrid 2000.
- 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.
- Azzurro, A., Ercoli, L., & Namuz, F. (2000). Una revisión de modelos predictivos de ruido urbano. TecniAcustica Madrid 2000.
- Bastián, N., Álvarez, J., & F. Morenoc. (2014). Evaluación de modelos de predicción de ruido de tránsito vehicular en ciudades pequeñas: casos ciudad de Valdivia y Osorno. Paper presented at the IX Congreso Iberoamericano de Acústica, FIA2014, Chile.
- 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.
- Domínguez, M. G. L., Sánchez, J. F. M., & Gutiérrez, R. T. (2009). Desarrollo de una propuesta de modelo e indicador de ruido generado por la operación del transporte carretero en México. México.
- Echeverry, C. L. Z., Ochoa, M. A. C., & Fernández, A. E. G. (2008). Desarrollo de un modelo matemático para la estimación de los niveles de ruido procedente del tráfico rodado en centros urbanos. VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008.
- Fuentes, M., García, E., Cepeda, J., Búrdalo, G., & Barrios, M. d. (2008). Modelo de predicción de ruido urbano adaptado a variables. Aplicación a la ciudad de León (España). VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008.
- García Ortiz, E. F. R., Marcos; Cepeda Riaño, Jesús; Búrdalo Salcedo, Gabriel; de Barrios Carro, Mercedes. (2009). Estudio de un modelo de predicción de ruido para un determinado tipo de vía urbana en la ciudad de León. Paper presented at the Tecniacústica, España.
- Hernández, S. V. R. (2013). Método de evaluación geoespacial multicriterio basada en datos históricos para la gestión del riesgo por ciclones tropicales. (Doctorado), Instituto Técnico Militar "José Martí", Cuba.
- Lozano, R. G. (2022). Método de modelación geoespacial de la contaminación sonora urbana por tráfico rodado. (Doctoral), Universidad Técnica Militar "José Martí". Miyara, F. Ajuste de un modelo del ruido de tránsito Miyara, F. Contaminación acústica urbana.
- Monarca, N. B., Rodenbeek, J. P. Á., Silva, E. S., & Montenegro, A. B. (2015). Elección de un modelo de ruido de tránsito vehicular para Chile. 46º Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica European Symposium on Virtual Acoustics and Ambisonics.
- Quintero, J., Frias, E. D., & Henríquez, F. (2018). Uso de modelos matemáticos para el cálculo de ruido en las principales avenidas de Panamá. RIC, 4.
- Rincón, A. V. d., & Ruiz, D. M. (2016). Modelos de previsión de ruido. Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente., XIV.
- Rodenbeek, J. P. Á., & Silva, E. S. (2011). Estudio comparativo para modelos predictivos del ruido de tráfico rodado, a través de mediciones in situ en un sector de la ciudad de Osorno. Síntesis Tecnológica.
- Simona Pujad, J., Jorge Sánchez, J., & Mulet Arias, J. F. (2010). Comparativa de nuevos modelos europeos de predicción de niveles de ruido de tráfico rodado. Paper presented at the 41 Congreso Nacional de Acústica; 6 Congreso Ibérico de Acústica, España.
- Vicente, H. C. (2014). Adaptación del modelo de predicción de ruido de tráfico rodado NMPBROUTES 2008 a la presencia de vehículos eléctricos. (Tesis Doctoral), Universidad Miguel Hernández Elche, España.

