

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE
INGENIERÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN
PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE RUIDO EN LA ZONA 1 DE LA
CABECERA MUNICIPAL DE MORALES, IZABAL, GUATEMALA



LEISSER EDUARDO MOSCOSO GUZMÁN

CHIQUMULA, GUATEMALA, MARZO 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE
INGENIERÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL

TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN



TRABAJO DE GRADUACIÓN

Sometido a consideración del Honorable Consejo Directivo

Por

LEISSER EDUARDO MOSCOSO GUZMÁN

Al conferírsele el título de

INGENIERO EN GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL

En el grado académico de

LICENCIADO

CHIQUIMULA, GUATEMALA, MARZO 2023

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE
INGENIERÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL**



**RECTOR
M.A. WALTER RAMIRO MAZARIEGOS BIOLIS**

CONSEJO DIRECTIVO

Presidente:	Lic. Zoot. Merlin Wilfrido Osorio López
Representante de Profesores:	Mtro. Helmuth César Catalán Juárez
Representante de Profesores:	Mtro. José Emerio Guevara Auxume
Representante de Graduados:	Ing. Agr. Henry Estuardo Velásquez Guzmán
Representante de Estudiantes:	A.T. Zoila Lucrecia Argueta Ramos
Representante de Estudiantes:	Br. Juan Carlos Lemus López
Secretaria:	Licda. Yessica Azucena Oliva Monroy
Monroy	

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Coordinador Académico:	Mtro. Carlos Leonel Cerna Ramírez
Coordinador de Carrera:	Mtro. José Ramiro García Álvarez

ORGANISMO COORDINADOR DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN

Presidente:	Mtro. Fredy Samuel López Coronado
Secretario:	Mtro. Victor Augusto Sandoval Roque
Vocal:	Mtro. José Ramiro García Álvarez

TERNA EVALUADORA

Inga. Karla Patricia Carrera Franco
Ing. Kevin D'allison Solórzano Cordon
Inga. Sharon Natalí España Villela

Chiquimula, noviembre de 2022

Señores:

Consejo Directivo

Centro Universitario de Oriente

Ciudad de Chiquimula

Honorables Miembros:

De conformidad con las normas establecidas por la ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el Honor de someter a su consideración el trabajo de graduación titulado: **“ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE RUIDO EN LA ZONA 1 DE LA CABECERA MUNICIPAL DE MORALES, IZABAL, GUATEMALA”**. Como requisito previo a optar al título de Ingeniera en Gestión Ambiental Local, en el grado académico de licenciado.

Esperando que el mismo llene los requisitos necesarios de aprobación, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Leisser Eduardo Moscoso Guzmán
201540651

REF. FSCL/EALP-GAL-01-2022
Chiquimula, 27 de octubre de 2022.

Lic. Zoot. Merlin Wilfrido Osorio López

Director CUNORI

Chiquimula, Ciudad

Respetable Lic Zoot. Osorio:

En atención a la designación efectuada por el programa de Trabajos de Graduación de la carrera de Gestión Ambiental Local, para asesorar a la estudiante **Leisser Eduardo Moscoso Guzmán** en el trabajo de investigación denominado **“ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE RUIDO EN LA ZONA 1 DE LA CABECERA MUNICIPAL DE MORALES, IZABAL, GUATEMALA”**, tenemos el agrado de dirigirnos a usted para informarle que se ha procedido a asesorar y orientar al sustentante sobre el contenido de dicho trabajo.

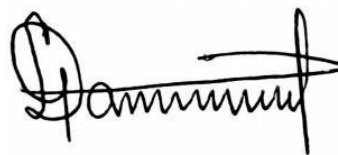
En nuestra opinión, el trabajo reúne los requisitos exigidos por las normas pertinentes; razón por la cual, recomendamos la aprobación del informe final para discusión en el examen general público, previo a optar al título de Ingeniero en Gestión Ambiental Local, en el grado académico de licenciado.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



MSc. Fredy Samuel López Coronado
Asesor



MSc. Dayryn Estéfany Girón de Zuquino
Asesora

EL INFRASCRITO DIRECTOR DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, POR ESTE MEDIO HACE CONSTAR QUE: Conoció el Trabajo de Graduación que efectuó el estudiante LEISSER EDUARDO MOSCOSO GUZMÁN titulado "ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE RUIDO EN LA ZONA 1 DE LA CABECERA MUNICIPAL DE MORALES, IZABAL, GUATEMALA", trabajo que cuenta con el aval del Revisor y Coordinador de Trabajos de Graduación, de la carrera de Gestión Ambiental Local. Por tanto, la Dirección del CUNORI, con base en las facultades que le otorgan las Normas y Reglamentos de Legislación Universitaria, **AUTORIZA** que el documento sea publicado como **Trabajo de Graduación** a Nivel de Licenciatura, previo a obtener el título de **INGENIERO EN GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL**.

Se extiende la presente en la ciudad de Chiquimula, a diecisiete de enero de dos mil veintitres.

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"

Lic. Zoot. Merlin Wilfredo Osorio López

DIRECTOR
CUNORI-USAC



ACTO QUE DEDICO

A DIOS:

Por tu amor y misericordia, porque me has guiado por el sendero correcto, nunca me has abandonado; por haberme dado una excelente familia, por permitirme conocer profesores y amigos de excelencia y has llenado mi corazón con la luz de tu espíritu y gracias a ello cumplo esta meta.

A MIS PADRES:

Gladys Elizabeth Guzmán Morales y Leixter Sotero Moscoso Moscoso, por su amor y apoyo incondicional, por los valores que me han inculcado, por su esfuerzo y dedicación, por ser un ejemplo de excelencia a seguir, por seguir apoyándome en mis triunfos y fracasos. Les agradezco todo lo que soy, por lo tanto, con toda honra les dedico este logro.

A MIS HERMANOS:

Tais Isabel Moscoso Guzmán y Aníbal Sotero Moscoso Guzmán, por su cariño y ser parte muy importante de mi vida, se los dedico con mucho amor para que sigan sus sueños y los cumplan.

A MI ESPOSA:

Yoselyn Carolina Santiago Martínez, este logro que estoy consiguiendo te lo dedico con mucha alegría y euforia, mi bella esposa porque has estado en cada

momento conmigo, en las buenas y en las malas. Gracias por tu amor y apoyo sincero.

A MIS ABUELITAS:

Floralma Moscoso, gracias por tu amor incondicional por tus enseñanzas. Gracias por hacerme mejor persona, este triunfo también es para ti con todo corazón. A mi abuelita Miriam Yolanda Morales Gálvez Q.E.P.D. ya no me lograste ver graduado, pero todo el amor que me diste y todo lo que me enseñaste, me convirtió en quien soy, y te lo dedico desde el corazón.

A MI FAMILIA:

Gracias tíos y primos, por su apoyo, por sus consejos y enseñanzas que se quedan en mi corazón. Gracias también por formar parte de mi vida y de este importante logro, que es de toda mi familia.

A MIS AMIGOS:

Nombrarlos a todos es demasiado extenso, pero todos mis amigos que he hecho a lo largo de mi vida (primaria, Básico, Diversificado, Universidad, e INAB), gracias a todos por dejar huella, por todas las divertidas historias y porque si no fuera por las amistades no seríamos lo que somos, les agradezco y dedico este logro.

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

**AL CENTRO UNIVERSITARIO DE
ORIENTE - CUNORI - CARRERA DE
INGENIERÍA EN GESTIÓN
AMBIENTAL LOCAL:**

Gracias a todo el personal, por haberme guiado y formado como un profesional de bien, con principios y valores que dicta la universidad y la carrera, por proyectarme hacia otras instituciones con buenas referencias.

A MIS ASESORES:

M.Sc. Fredy Coronado y M.Sc. Dayryn Girón, por el tiempo y la paciencia que me brindaron, por la guía y sabiduría que me otorgaron para obtener mi investigación.

MIS CATEDRÁTICOS:

A todos los que han compartido conmigo, pero especialmente a los docentes de la Universidad, por la paciencia de enseñarme, compartir su vida con nosotros los estudiantes y motivarnos a seguir adelante.

A:

Mario Díaz, Hedward Acosta, Kevin Solórzano, por el apoyo otorgado para la elaboración del presente estudio, logrando que esta investigación tenga mayor calidad investigativa.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	1
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
4. JUSTIFICACIÓN	2
5. OBJETIVOS	3
5.1 Objetivo general	3
5.2 Objetivos específicos	3
6. MARCO TEÓRICO	4
6.1 Sonido	4
6.1.1 Propagación del sonido	4
6.1.2 Frecuencia	9
6.1.3 Intensidad sonora	10
6.1.4 El umbral de audición	10
6.2 Ruido	10
6.2.1 Tipos de ruido	10
6.2.2 Tipos de fuentes de ruido	11
6.2.3 Contaminación sonora	12
6.3 Medición de sonido	13
6.3.1 El decibel (dB)	13

6.3.2	Sonómetro	14
6.3.3	Curvas de ponderación frecuencial	14
6.3.4	Tiempo de respuesta del instrumento	15
6.3.5	Nivel sonoro continuo equivalente (LAEq)	16
6.3.6	Elementos modificadores de la propagación del ruido	16
6.4	Mapas de ruido y métodos de interpolación	17
6.4.1	Mapas de ruido ambiental	17
6.4.2	Metodologías para definir puntos de medición sonora	18
6.4.3	Métodos de interpolación	19
6.5	Conceptos de geoestadística	25
6.5.1	Estadística espacial	25
6.5.2	Geo estadística	25
6.5.3	Variable Regionalizada.	25
6.5.4	Semivarianza	26
6.5.5	Semivariograma	26
6.6.6	Validación cruzada	28
6.7.7	Estadísticos	28
7.	MARCO REFERENCIAL	31
7.1	Área de estudio	31
7.2	Uso del suelo	33
7.3.	Estudios a nivel nacional	34
7.4.	Estudios a nivel mundial	35
8.	MARCO METODOLÓGICO	36
8.1	Generación de información de los niveles sonoros emitidos en el área de estudio para analizar su variación temporal	36

8.1.1 Definición de cantidad y distribución de puntos de monitoreo	36
8.1.2 Selección del indicador del nivel sonoro	39
8.1.3 Toma de muestra de los niveles sonoros	39
8.1.5 Método para la medición de los niveles sonoros	41
8.1.6 Análisis de los niveles sonoros	42
8.2 Definición de métodos de interpolación a utilizar en el área de estudio	43
8.2.1 Identificación de métodos de interpolación	43
8.2.2 Selección de tres métodos de interpolación	43
8.2.3 Comparación tres métodos de interpolación	45
8.2.4 Elaboración de mapas	47
8.3 Lineamientos generales	47
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
9.1 Comparación de tres métodos de interpolación	48
9.1.1 Selección de tres métodos de métodos de interpolación	48
9.1.2 Análisis exploratorio	50
9.1.3 Comparativa entre valores predichos y valores medidos	51
9.1.4 Mapa de ruido según método de interpolación kriging	52
9.1.5 Mapa de ruido según funciones de base radial (RBF)	53
9.1.6 Mapa de ruido según ponderación por distancia inversa (IDW)	54
9.2 Análisis de los niveles sonoros en el área de estudio	55
9.2.1 Niveles de ruido en las zonas comerciales y de exterior habitable	55
9.2.2 Niveles sonoros promedio por punto de monitoreo	59
9.2.3 Niveles sonoros promedio por horario	61
9.3 Lineamientos generales para la gestión del ruido en área de estudio	62
10. CONCLUSIONES	67

11. RECOMENDACIONES	69
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
13. ANEXOS	76
13. APÉNDICES	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
1	Métodos de interpolación en ESRI	20
2	Ubicación geográfica de los puntos de monitoreo en la zona de estudio del casco urbano de Morales	38
3	Distribución de puntos de monitoreo por bloques	40
4	Horarios y días establecidos para monitoreo de los niveles sonoros	41
5	Valoración de las características de los métodos de interpolación	44
6	Indicadores estadísticos para la validación cruzada	45
7	Estadísticos para comparativa entre valores predichos y valores medidos	46
8	Matriz de priorización de métodos de interpolación, valorados según la funcionalidad para realizar mapas de ruido en zonas urbanas	49
9	Comparación de los métodos de interpolación según indicadores estadísticos	50
10	Comparación entre valores predichos y valores medidos de tres métodos de interpolación	51
11	Niveles sonoros en la zonas según el tipo del suelo en el área de estudio	55
12	Niveles sonoros en las zonas comerciales del área de estudio	56

Tabla	Descripción	Página
13	Niveles sonoros en las zonas de exterior habitable del área de estudio	56
14	Niveles sonoros en las zonas de equipamiento del área de estudio	57
15	Niveles sonoros en las zonas de protección del área de estudio	57
16	Nivel promedio de emisiones sonoras por punto en el área de estudio	59
17	Lineamientos generales para la gestión del ruido en el área de estudio	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1	Componentes de una curva senoide	8
2	Comparación entre dos funciones con diferente frecuencia	9
3	Curva de ponderación frecuencial	15
4	Árbol según la capacidad de generar predicciones	21
5	Árbol si el método requiere medición o correlación espacial del modelo	21
6	Árbol según salida de información	22
7	Árbol según cantidad de supuestos y complejidad	22
8	Árbol según exactitud de sus puntos	23
9	Árbol según suavidad de salida de datos	23
10	Árbol según la predicción de medidas de incertidumbre	24
11	Árbol según velocidad de análisis	24
12	Ejemplo de gráfico de semivarianza	26
13	Ejemplo de gráfico de semivariograma empírico	27
14	Ejemplo de gráfico de semivariograma empírico	27
15	Funcionamiento de la validación cruzada	28
16	Mapa del ubicación del área de estudio	32
17	Mapa de categoría y uso de suelo del área de estudio	32
18	Mapa de puntos de monitoreo en el área de estudio	37

Figura	Descripción	Página
19	Mapa de ruido del área de estudio utilizando método de interpolación kriging	52
20	Mapa de ruido del área de estudio utilizando funciones de base radial (RBF)	53
21	Mapa de ruido del área de estudio utilizando ponderación por distancia inversa (IDW)	54
22	Niveles de ruido según el tipo de uso de suelo en el área de estudio	58
23	Niveles sonoros promedio de los puntos monitoreados en el área de estudio en el año 2020	60
24	Niveles sonoros promedio por horario de los puntos monitoreados en el área de estudio en el año 2020	61

1. INTRODUCCIÓN

El mapeo geográfico ha ido cobrando cada vez más relevancia como herramienta para la toma de decisiones en diferentes ámbitos, incluida la gestión del ruido en el contexto de la gestión ambiental. Los mapas son un instrumento de suma importancia para la caracterización y análisis de niveles sonoros orientado a la gestión del ruido; sin embargo, el análisis de información geográfica implica no solo la recolección de información en campo y su vinculación con datos geoespaciales, sino también la aplicación de herramientas matemáticas y estadísticas que permitan estimar valores desconocidos a partir de la información disponible, lo cual se conoce como interpolación en el ambiente de SIG; sin embargo, en Guatemala existe muy poca investigación acerca de los métodos de interpolación más idóneos para generar información espacial de manera precisa.

En la presente investigación se analizaron tres métodos generales de interpolación: Krigin, IDW, y spline, en un entorno urbano, utilizando como área de estudio la zona uno de la cabecera municipal de Morales, Izabal, la cual cuenta con una población aproximada de 23,855 habitantes según el más reciente censo a nivel nacional (INE, 2018), en la cual existen fuentes de ruido fijas y móviles debido a que se trata de un área predominantemente comercial, pero también con viviendas particulares, industria y la carga vehicular de transporte pesado y liviano.

Se realizó una recopilación de datos sonoros durante un periodo de seis semanas, comprendido entre julio y agosto del 2020, con un diseño sistemático no lineal, con alta densidad de puntos, utilizando un sonómetro calibrado, el cual generó información estadística de cada método para realizar una estimación del comportamiento del ruido y analizar con métodos geoestadísticos como la validación cruzada, la precisión en la elaboración de mapas de ruido.

Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación se formularon lineamientos generales orientados a la gestión ambiental del área de estudio, contribuyendo a la reducción de la contaminación por ruido y mejorando el ambiente para los habitantes de la población de la zona uno del municipio de Morales. La información generada en esta investigación puede ser utilizada como punto de partida para la

investigación de la contaminación sonora en entornos locales como los municipales y apoyar el desarrollo de herramientas de gestión que ayuden a mitigar la problemática de la contaminación sonora.

2. ANTECEDENTES

El ruido es un problema ambiental relevante que afecta la salud del ser humano, sin embargo, los mecanismos para gestionar el problema varían dependiendo de la cultura y las políticas locales. Según la OMS (1999), la prolongación a ruidos intensos por intervalos largos de tiempos genera efectos adversos en la salud de las personas tanto física como mental. Identificaron valores específicos de ruido que afectan la salud en un ambiente determinado, por lo tanto, definen estrategias y prioridades para manejar los niveles de ruido en interiores, la gestión de políticas y legislación sobre el ruido.

En la última década se han desarrollado nuevas tecnologías que han facilitado la generación de los mapas de ruido, los cuales han sido un instrumento de suma importancia para la caracterización y monitoreo de los niveles sonoros, tanto para entornos laborales y domésticos como para entornos urbanos; su estudio es de suma importancia para una mayor eficiencia al realizar la investigación y facilitar la toma de decisiones que favorezcan la protección del medio ambiente y salud.

De acuerdo al Protocolo para medir la emisión de ruido generado por fuentes fijas de Echeverri y González (2011), se establece la metodología y los procedimientos necesarios para llevar a cabo las funciones de evaluación, control y seguimiento del ruido proveniente de las fuentes fijas de emisión de ruido, de una manera estandarizada, el cual se orienta a implementar en forma detallada el procedimiento para determinar la emisión de ruido; en donde, sin embargo, no muestra la forma en la cual analizar los datos ni el modelo de interpolación utilizar para generar mapas de ruido.

Murillo et al. (2012) presentaron un estudio efectuado con el propósito de analizar la congruencia de los métodos de interpolación en la generación de mapas de ruido, donde realizó mediciones sonoras, y utilizó métodos de interpolación de kriging e IDW en el software de SIG ArcGis, donde se realizó un análisis geoestadístico para determinar qué modelo presentaba resultados más precisos, llevando a cabo una valoración del mapa de ruido obtenido y comparándola con la legislación colombiana, en donde concluyó que en ambos métodos de interpolación el de kriging se correlaciona de mejor manera con los estadísticos de los puntos medidos.

Grijalba (2018) examinó la influencia de la variabilidad espacio temporal del paisaje sonoro en la calidad de entornos acústicos de una pieza urbana de la ciudad de Popayán-Colombia, prestando particular atención al vínculo de la experiencia sonora del habitante de la ciudad con el ruido ambiental y el contexto urbano adyacente, donde, a través de un análisis geoestadístico determinó que el método de interpolación de kriging era el que le presentaba menos error, con lo que los valores físicos y perceptuales del paisaje sonoro de una pieza urbana fueron registrados y comparados mediante la recolección de datos in situ.

Actualmente, en Guatemala se presenta un déficit de investigaciones sobre el ruido, y no existe un reglamento o guía para la medición de ruido en ambientes urbanos y el análisis de datos mediante un software SIG que permita representar de manera geoespacial los niveles sonoros locales y la magnitud de dicha problemática.

La investigación realizada por España (2015) generó información de los niveles sonoros emitidos en la zona 1 de la ciudad de Chiquimula durante un periodo de tiempo comprendido de marzo a junio del año 2015, como un insumo de la gestión ambiental del ruido a nivel urbano, donde determinó a través de la prueba de Friedman y el análisis de Duncan que en la zona 1 no existe diferencia estadísticamente significativa entre niveles sonoros de los puntos monitoreados, y que los decibelios tomados sobrepasan lo recomendado por la OMS.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento urbano conlleva un mayor número de actividades diarias por las necesidades de las personas de comerciar, socializar, y moverse, lo que repercute en un aumento de niveles sonoros en determinados sectores del entorno urbano. Si los niveles sonoros son muy altos puede generar contaminación por ruido, disminuyendo la calidad de vida de la población. Las continuas exposiciones de la población a niveles altos de ruido pueden ocasionar daños directos (lesiones o traumatismo del aparato auditivo, problemas cardiovasculares) e indirectos (estrés, accidentes, salud mental) en la salud de las personas, así como bajar el desempeño eficiente de las actividades que realizan.

Una manera de analizar la problemática de ruido a nivel urbano es la generación de mapas de los niveles sonoros presentes en el área de estudio. Para elaborar mapas de ruido existen varias metodologías de interpolación disponibles en programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Con cada uno de los métodos se obtiene una variación espacial que no siempre coinciden entre sí y por lo tanto pueden variar con los datos reales.

Sin embargo, no existen estudios que indiquen qué método de interpolación disponible en los programas de SIG es el que genera mayor precisión en la elaboración de mapas de ruido en entornos urbanos.

En la actualidad, en el municipio de Morales no se han generado mapas de ruido a nivel urbano y, por lo tanto, tampoco se ha evaluado cuál método representa mejor la problemática de la contaminación sonora; la falta de datos e investigaciones con información actual y verídica sobre las emisiones de decibelios que se presentan en las diferentes zonas del área urbana del municipio, disminuye la efectividad de las decisiones para la regulación, prevención o mitigación de la contaminación acústica que realiza el municipio, disminuyendo el bienestar físico y emocional, reduciendo así la calidad de vida.

4. JUSTIFICACIÓN

La contaminación sonora es una problemática ambiental que existe en todos los centros urbanos del planeta, sin embargo, las magnitudes de las emisiones dependerán del tipo de agente que lo causa como el tráfico vehicular, las actividades comerciales, industriales y recreativas. Según investigadores asociados al organismo de evaluación y fiscalización ambiental del ministerio de ambiente de Perú (OEFA), según la zona de aplicación: zonas de protección especial (áreas donde se encuentren ubicados establecimientos de salud, centros educativos, asilos y orfanatos), zonas residenciales, zonas comerciales, y zonas industriales, existen niveles máximos de ruido en el ambiente que no deben sobrepasarse, y cada zona le corresponde un nivel de ruido para horarios diurnos y nocturnos.

En el caso de Guatemala, no se han diseñado leyes o reglamentos que regulen los niveles sonoros que se deben emitir, donde sin embargo, pocos municipios, han creado ordenanzas municipales, las cuales regulan la contaminación sonora; entre estos municipios está Morales, el cual es el único del departamento de Izabal que cuenta con una ordenanza de esa naturaleza, sin embargo, la ordenanza queda limitada, debido a la falta de información y estudios relacionados al ruido a nivel municipal; por tal razón, se considera importante determinar los niveles sonoros que se generan en las zonas de mayor congestión debido a las actividades cotidianas que se llevan a cabo, y así establecer si existe contaminación sonora de la misma.

Determinar el método de interpolación geoespacial que mejor se ajuste, para elaborar mapas de ruido a nivel urbano permitirá hacer mapas del problema de contaminación sonora más precisos y que las autoridades locales e instituciones puedan planificar de manera integrada y eficiente la distribución de las actividades dentro del casco urbano, así mismo generar y/o mejorar los instrumentos de gestión ambiental; para ello se utilizó una metodología acorde con los objetivos planteados para el estudio, determinando así la situación actual de los niveles sonoros en las áreas de estudio.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Evaluar tres métodos de interpolación para analizar la precisión de los mapas de ruido a nivel urbano en el municipio de Morales Izabal.

5.2 Objetivos específicos

- Determinar la variación espacial y temporal de los niveles sonoros en el área de estudio para una gestión ambiental de acuerdo al nivel sonoro permitido por tipo de área.
- Comparar tres métodos de interpolación geográfica para elaborar mapas de ruido que permita seleccionar el que mejor se ajuste a los datos de niveles sonoros del área en estudio.
- Proponer lineamientos generales de gestión ambiental de acuerdo a los niveles sonoros determinados en cada zona del área de estudio.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 Sonido

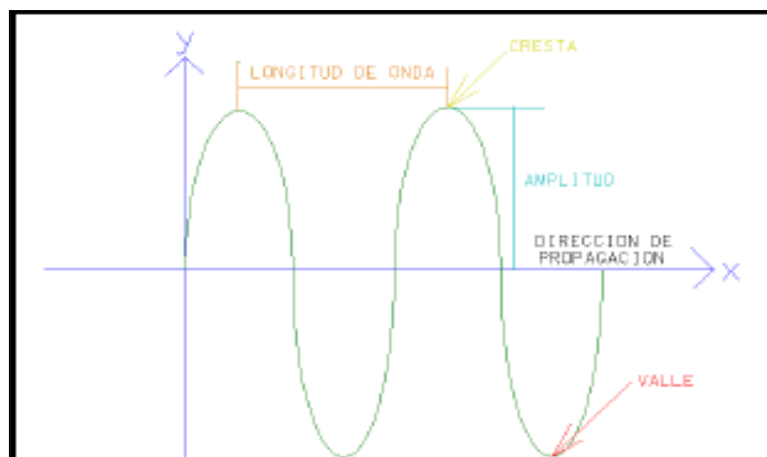
El sonido tiene su origen en la vibración (movimiento de moléculas) de un medio elástico (agua, aire, metal, entre otros) a partir de un foco que induce cambios de presión, los mismos que se transmiten por propiedades del movimiento ondulatorio. Aunque las ondas sonoras avanzan en el medio, éste se mantiene inmóvil. Podemos entonces deducir que en el vacío no existirá sonido, ya que no existe un medio cuya presión cambie (Cando y Utreras, 2007).

6.1.1 Propagación del sonido

La propagación del sonido se realiza mediante ondas, estas se describen como un vaivén tanto en el espacio como en el tiempo, el cual se extiende de un lugar a otro. El movimiento oscilatorio de un péndulo se denomina movimiento armónico simple el cual se representa por una curva especial llamada senoide o senoide, la misma que nos permite describir gráficamente la propagación de una onda (Hewitt, 2004).

Una longitud de onda es la distancia entre dos crestas o valles adyacentes, que presentan una amplitud y dirección en la propagación del sonido (Hewitt, 2004). En la figura 1, se puede observar los elementos de una curva senoide.

Figura 1. Componentes de una curva senoide



Fuente: Gómez y Parra, 2012.

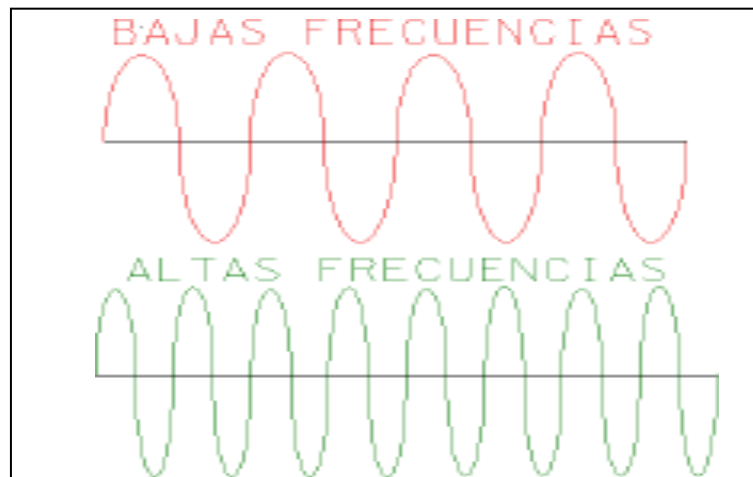
6.1.2 Frecuencia

La frecuencia es el número de oscilaciones por unidad de tiempo, la cual se define como las vibraciones producidas por segundo, siendo denominadas en el sistema internacional de medidas como Hertz (Hz) (Gómez y Parra, 2012).

$$1 \text{ hz} = \frac{1 \text{ ciclo}}{s} = \frac{1}{s}$$

La frecuencia de una onda tiene una relación inversa con el concepto de longitud de onda, es decir cuando la frecuencia es alta tiene menor longitud de onda y viceversa (Gómez y Parra, 2012). En la figura 2 se muestra la diferencia entre funciones de diferente frecuencia.

Figura 2. Comparación entre dos funciones con diferente frecuencia



Fuente: Gómez y Parra, 2012.

El ser humano en una etapa de crecimiento joven es capaz de captar frecuencias entre 20 y 20,000 hertz, cuando se va madurando, los límites de las frecuencias audibles se contraen, a las frecuencias menores a 20 hertz se les denomina como infra sónicas, y las que están arriba de las 20,000 hertz se les denomina ultrasónicas (Hewitt, 2004).

6.1.3 Intensidad sonora

La intensidad del sonido (o sonora) es la potencia transferida por una onda sonora a través de la unidad de área normal a la dirección de propagación, cuando el ser humano califica el volumen que se genera de una fuente, está asociando la intensidad sonora que se produce en dicha fuente (Gómez y Parra, 2012).

$$Intensidad = \frac{Potencia}{Area}$$

6.1.4 El umbral de audición

El umbral de audición, es la intensidad mínima de sonido capaz de impresionar al oído humano. En público joven y sin problemas auditivos se encuentra en $10^{-10} \mu W \text{ cm}^2$ para una frecuencia de 1000 Hz (Gómez y Parra, 2012).

6.2 Ruido

El ruido es considerado como un fenómeno vibratorio que es detectado por el oído y provoca molestia, es decir, el ruido es la sensación auditiva no deseada correspondiente generalmente a una variación aleatoria de la presión a lo largo del tiempo (Brüel y Kjær, 2000).

6.2.1 Tipos de ruido

El ruido puede clasificarse según su temporalidad, donde factores como la constancia, continuidad e intensidad en las fluctuaciones de sonido determinan que tipo de ruido es. De acuerdo a su temporalidad el ruido se clasifica de la siguiente forma (CAR, 2007):

- **Ruido Continuo:** Es aquel que se manifiesta de manera ininterrumpida por más de 5 minutos, es decir, no presenta cambios repentinos durante su emisión. Generalmente es producida por maquinaria como: ventiladores, bombas y equipos de procesos. Este tipo de ruido es raro que se produzca en una ciudad o en un recinto industrial.

- **Ruido fluctuante:** Es un ruido que varía a lo largo del tiempo, presentando variaciones sonoras superiores a los 5 dB(A) Lento de manera aleatoria.
- **Ruido de fondo:** Es aquel ruido que predomina en ausencia del ruido emitido por la fuente que está siendo evaluada.
- **Ruido estable:** Es aquel ruido que permanece esencialmente contante, presentando variaciones menores a 5 dB(A) Lento entre el máximo y el mínimo valor registrado.
- **Ruido de impacto:** Es un ruido de muy corta duración, por lo tanto, el nivel de presión sonora aumenta rápidamente. Generalmente son producidos por el choque de superficies sólidas.
- **Ruido intermitente:** Son aquellos ruidos cuyos niveles de presión y espectro de frecuencia varían entre unos límites y además estas variaciones son constantes, siendo el ruido más común.

6.2.2 Tipos de fuentes de ruido

Existen varios tipos de fuente generadora de sonido o ruido, definidas por características propias que hacen diferente la propagación y reproducción del sonido, de acuerdo a la distancia que se propaga el sonido estas se definen como (Brüel y Kjær, 2000):

- **Fuente Puntual:** Si las dimensiones de una fuente de ruido son pequeñas comparadas con la distancia al oyente, entonces se llama fuente puntual, por ejemplo, ventiladores y chimeneas. La energía sonora se propaga de forma esférica, por lo que, el nivel de presión del sonido es el mismo en todos los puntos que se encuentran a la misma distancia de la fuente y disminuye en 6 dB al doblar la distancia; esto se mantiene así hasta que el efecto del suelo y la atenuación del aire influyen de forma notoria en el nivel.

- **Fuente lineal:** Si una fuente de ruido es estrecha en una dirección y larga en la otra comparada con la distancia al oyente, ésta es llamada fuente lineal. Puede ser una fuente individual tal como una cañería llevando un fluido turbulento o puede estar compuesta de muchas fuentes puntuales operando simultáneamente, como una sucesión de vehículos en una carretera concurrida.

El nivel de sonido se propaga cilíndricamente, por lo que el nivel de presión sonora es el mismo en todos los puntos a la misma distancia de la línea y disminuye en 3 dB al doblar la distancia. Esto se mantiene así hasta que el efecto del terreno y la atenuación del aire influyen de forma notoria al nivel.

Con base en factores como su posición y movilidad las fuentes de ruido ambiental pueden clasificarse de la siguiente forma:

- **Fuente fija:** La fuente fija se considera como un elemento o un conjunto de elementos capaces de producir emisiones de ruido desde un inmueble, ruido que es emitido hacia el exterior, a través de las colindancias del predio, por el aire y/o por el suelo. La fuente fija puede encontrarse bajo la responsabilidad de una sola persona física o social (Brüel y Kjær, 2000).
- **Fuente móvil:** El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, citado por España (2015) define como fuentes móviles a los vehículos de transporte de pasajeros o de carga en carretera, tales como automóviles, furgonetas, buses, camiones, camionetas y motocicletas.

En general, los términos ruido urbano o ruido ambiente se refieren al nivel de ruido existente en exteriores, en cercanías de áreas habitadas, aludiendo que las principales fuentes que contribuyen al ruido en exteriores son los medios de transporte, industrias, construcciones, personas y animales.

6.2.3 Contaminación sonora

La contaminación sonora es la presencia en el ambiente de niveles de ruido que implique molestia, genere riesgos, perjudique o afecte la salud y al bienestar humano, los bienes

de cualquier naturaleza o que cause efectos significativos sobre el medio ambiente (OEFA, 2016).

6.3 Medición de sonido

6.3.1 El decibel (dB)

El decibel (dB) se usa para expresar el nivel de sonido asociado con las mediciones de ruido. Los decibels no son unidades lineales, sino puntos representativos de una curva rápidamente ascendente, si se duplica la intensidad de un sonido, aumenta en tres decibels, no se duplicará su número (Camposeco, 2003).

Cuando se compara la intensidad de dos sonidos y se afirma que un sonido es diez veces mayor que la intensidad de otro, se dice que la razón de intensidad es un bel (B). De esta manera cuando se comparan las intensidades de dos sonidos, se refiere a una diferencia en los niveles de intensidad dados por (Tippens, 2009):

$$B = \log_{10} I_1/I_0$$

Donde;

I_1 , intensidad sonora a estudiar,

I_0 , intensidad inicial.

Sin embargo, un bel resulta ser demasiado grande; para obtener una unidad más útil se definió un decibel (dB) como la décima parte de un bel.

$$dB = 10\log_{10} I_1/I_0$$

Donde;

I_1 , intensidad sonora a estudiar,

I_0 , intensidad inicial.

Gracias a la notación logarítmica del decibel, ha sido posible reducir el intervalo de intensidades; sin embargo, debe recordarse que la escala no es lineal sino logarítmica. Un sonido de 40 dB es mucho mayor que el doble de intensidad de un sonido de 20 dB.

6.3.2 Sonómetro

El sonómetro es un instrumento que sirve para medir niveles de presión sonora. En resumen, el sonómetro mide el nivel de ruido que existe en determinado lugar y en un momento dado. Los parámetros que se consideran en la medición de niveles sonoros son: ponderación frecuencial, tiempo de respuesta del instrumento y los indicadores de nivel sonoro (Brüel y Kjær, 2000).

6.3.3 Curvas de ponderación frecuencial

Al realizar las curvas isofónicas, se observará una dependencia de la sonoridad con la frecuencia. En las curvas isofónicas, en bajas y en muy altas frecuencias, se incrementa la intensidad del sonido, mientras en frecuencias medias la intensidad se mantiene (Miyara, s.f.).

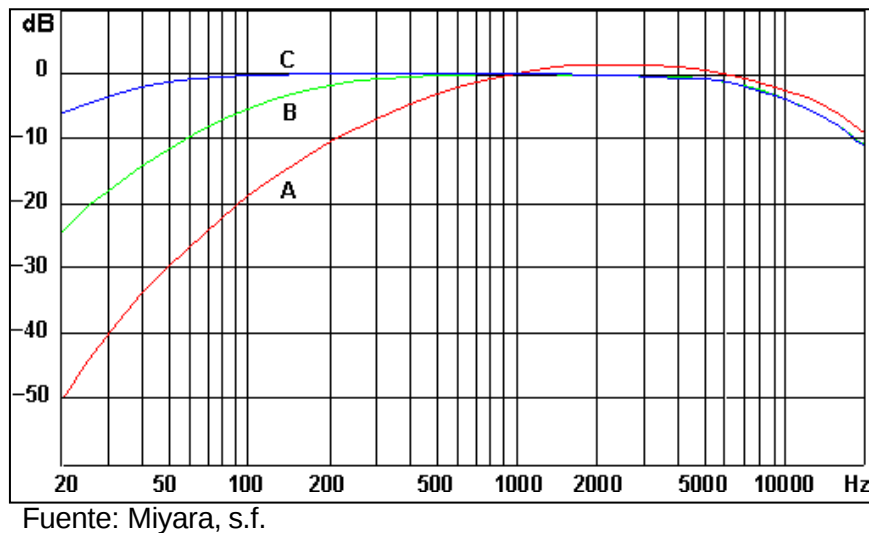
Se pensó que utilizando una red de filtrado (o ponderación de frecuencia) adecuada sería posible medir esa sensación en forma objetiva. Esta red de filtrado tendría que atenuar las bajas y las muy altas frecuencias, dejando las medias casi inalteradas. Por lo tanto, parecía razonable diseñar tres redes de ponderación de frecuencia correspondientes a niveles de alrededor de 40 fon, 70 fon y 100 fon llamadas A, B, C y D (Felipe, 2010):

- **Ponderación A:** Es la red de ponderación más comúnmente utilizada para la valoración de daño auditivo e inteligibilidad de la palabra. Empleada inicialmente para analizar sonidos de baja intensidad, es hoy, prácticamente, la referencia que utilizan las leyes y reglamentos contra el ruido producido a cualquier nivel.
- **Ponderación B:** Fue creada para modelar la respuesta del oído humano a intensidades medias. Sin embargo, en la actualidad es muy poco empleada. De hecho, una gran cantidad de sonómetros ya no la contemplan
- **Ponderación C:** En sus orígenes se creó para modelar la respuesta del oído ante sonidos de gran intensidad. En la actualidad, ha ganado prominencia en la evaluación de ruidos en la comunidad, así como en la evaluación de sonidos de baja frecuencia en la banda de frecuencias audibles.

- **Ponderación D:** Esta red de compensación tiene su utilidad en el análisis del ruido provocado por los aviones.

Las curvas de sonoridad de Fletcher y Munson (al igual que las finalmente normalizadas por la ISO) son promedios estadísticos. Esto significa que los valores obtenidos son aplicables a poblaciones no a individuos específicos. Así mismo las curvas isofónicas fueron obtenidas para tonos puros, es decir sonidos de una sola frecuencia, los cuales son muy raros en la naturaleza. La mayoría de los sonidos de la vida diaria, tales como el ruido ambiente, la música o la palabra, contienen muchas frecuencias simultáneamente (Miyara, s.f.).

Figura 3. Curva de ponderación frecuencial



6.3.4 Tiempo de respuesta del instrumento

Para determinar los niveles de presión (o potencia sonora) de una fuente, los instrumentos de medición realizan un promedio durante un intervalo de tiempo. Generalmente los medidores incorporan opciones “Fast” o rápido y “Slow” o lento que corresponden a los tiempos promediados de 125 microsegundos (ms) y 1 segundo (s) respectivamente (Gómez y Parra, 2012).

La medición “Slow es considerablemente más grande que el tiempo promedio de audición, y es utilizada para obtener una lectura continua, cuando el nivel de sonido fluctúa rápidamente en promedio. La medición “Fast” es comúnmente utilizada para caracterizar los niveles máximos cuando fluctúa considerablemente la presión de sonido (Gómez y Parra, 2012).

6.3.5 Nivel sonoro continuo equivalente (LAEq)

El nivel de sonido continuo equivalente (Leq) es el nivel constante en db(A) que durante el período de medición, representara la misma cantidad de energía presente en el nivel de presión sonora medido y fluctuante (Brüel y Kjær, 2000).

El nivel sonoro en dB(A) de un ruido constante hipotético correspondiente a la misma cantidad de energía acústica que el ruido real considerado, en un punto determinado durante un período de tiempo, dado (España, 2015):

$$Leq(A) = 10 * \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{Li(A)/10} \right]$$

Dónde;

n, es el tiempo de observación durante el cual el nivel sonoro es Li dB(A).

6.3.6 Elementos modificadores de la propagación del ruido

Existen factores meteorológicos que alteran o modifican la propagación del ruido, entre los cuales están (Brüel y Kjær, 2000):

- **Viento:** Las propagaciones de los sonidos se ven afectadas por las masas de aire, provocando una mejor percepción en los aparatos de medición cuando éstos se encuentran en la misma dirección que sopla el viento y mala percepción cuando el aparato de medición se encuentre en dirección contraria a la del viento.
- **Temperatura:** La velocidad con la que se propaga el sonido va a depender directamente de la temperatura, ya que cuando la temperatura aumenta, la

longitud de onda del sonido aumenta, y cuando la temperatura disminuye, la longitud de onda del sonido disminuye.

- **Humedad:** Al existir mayor humedad, se produce una mejor propagación del sonido debido a la menor resistencia acústica del aire, mientras que en caso de haber menor humedad la propagación del sonido disminuye debido a la resistencia acústica del aire.
- **Lluvia y niebla:** La capacidad del sonido de transportarse en la neblina o en precipitaciones débiles de cualquier tipo no se debe a ningún cambio físico del medio que conduce a su mejor propagación, sino más bien a una reducción de la actividad humana produciendo un nivel de ruido de fondo más bajo que el normal durante estos períodos.
- **Influencia del operador:** La presencia del operador no solo puede bloquear el sonido que llega en una dirección dada, sino que puede causar reflexiones que produzcan errores de medida. Se aconseja que el operador se sitúe en el plano normal al eje del micrófono y a una distancia de 0.5 m o más.

6.4 Mapas de ruido y métodos de interpolación

6.4.1 Mapas de ruido ambiental

Un mapa de ruido es la representación cartográfica de los niveles de presión sonora existentes en una zona concreta y en un período determinado. La utilidad del mapa de ruido es determinar la exposición de la población al ruido ambiental, para así adoptar los planes o programas necesarios para prevenir y reducir el ruido ambiental y, en particular, cuando los niveles de exposición puedan tener efectos nocivos en la salud humana (Aistec, 2022).

El término general de mapas de ruido se suele utilizar para referirse a mapas horizontales de líneas isofónicas a cierta altura del suelo. El nivel al que se refieren las líneas isofónicas suele ser un nivel sonoro continuo equivalente. Los mapas de ruido pueden

ser además generales o específicos sobre una o varias fuentes determinadas (Sánchez, 2011).

Los mapas urbanos serían del primer tipo, mientras que es frecuente realizar mapas específicos del entorno de las carreteras, de los ferrocarriles, de los aeropuertos, de canteras, zonas recreativas, zonas de obra, zonas industriales (Sánchez, 2011).

Al elaborar un mapa de ruido es necesario determinar en primer lugar las características del mapa que se desea obtener, entre las que se pueden mencionar (Sánchez, 2011):

- General o específico para una fuente
- Ámbito del mapa y altura sobre el suelo
- Escala de trabajo y precisión de los datos
- Índices acústicos e información reflejados en el mapa

6.4.2 Metodologías para definir puntos de medición sonora

El muestreo es un procedimiento para conocer algunas características de la población con base en una muestra extraída de ella. El objetivo de un diseño de muestreo es definir el esquema de muestreo a utilizar, se determina el tamaño y procedimiento de selección y distribución de la muestra (INEGI, 2011).

La unidad de muestreo permite relacionar la localización de la información del mapa con la del terreno. Existen diferentes metodologías de medición, los cuales se mencionan a continuación (Saquisilí, 2015):

- **Metodología de la cuadrícula, retícula o sistemático:** Este método consiste en trazar sobre el mapa del área de estudio una rejilla con cuadrículas cuyas dimensiones son proporcionales a la superficie del área de análisis. Los puntos de medición se pueden ubicar en los nodos, en la mitad de la cuadrícula, en el punto o en la vía más cercana (sistemático no lineal). El valor medido en este punto será asignado a la casilla que lo contiene como centro.

- **Metodología de viales:** En este método los puntos de medición son ubicados en las principales vías que soportan un alto flujo vehicular, por ello, es fundamental realizar un estudio urbanístico previo de la zona de estudio, categorizar las vías (vías principales y secundarias), determinar tramos de vías similares y en función de estos criterios se establecen los puntos de medición. Esta técnica permite que el número de puntos a medir sea menor y por ende los costos asociados a este tipo de estudios disminuyen. La representación gráfica es más adecuada que la de los mapas que utilizan cuadrículas, dado que sólo proporcionan valores de niveles de ruido referidos a las vías. Este método proporciona una visión general del ambiente sonoro de la zona evaluada, ya que solo valora el tráfico vehicular.
- **Metodología de conglomerados:** En este método los puntos de medición son determinados según el tipo de fuente a medir, y distribuidos según los intereses que se persigan con el estudio. Por ejemplo, las fuentes fijas, como: talleres, bares, industrias, etc., normalmente tienen limitaciones de inmisión y métodos propios de evaluación, y un mapa con estas características podrá satisfacer a esta normativa, pero no será válido para otras fuentes como el caso del tráfico, y esto conlleva a que sus resultados no sean comparables con otros mapas.
- **Metodologías aleatorias:** Los puntos de medición son definidos al azar siguiendo algún tipo de proceso predeterminado. Se pueden hacer encuestas, asignar números aleatorios a diferentes zonas de la ciudad, etc. Otra forma de determinar estos puntos es por medio de la utilización de una cuadrícula, pero no se toman en cuenta todos los puntos de ella, sino se eligen al azar cuáles de estos se medirán.

6.4.3 Métodos de interpolación

Las geoestadísticas, son un conjunto de métodos que permiten estimar valores para ubicaciones en las que no se han tomado muestras y también valorar la incertidumbre de esas estimaciones. Estas funciones son esenciales en muchos procesos de toma de decisiones, ya que es imposible en la práctica tomar muestras en todas las ubicaciones de un área de interés (ESRI, 2016).

Estos métodos son un medio que permite crear modelos de la realidad, modelos que se adapten a sus necesidades específicas donde proporcionen la información necesaria para tomar decisiones bien fundamentadas y defendibles. Un aspecto importante de la creación de un buen modelo es la comprensión del fenómeno, como se han obtenido y qué representan los datos de muestra, además de definir se espera que proporcione el modelo (ESRI, 2016).

Hay numerosos métodos de interpolación. Algunos de ellos son muy flexibles y pueden reflejar diversos aspectos de los datos de muestra. Otros son más restrictivos y requieren que los datos se ajusten a unas condiciones específicas. Los métodos kriging, por ejemplo, son muy flexibles, pero dentro de la familia kriging hay distintos grados de condiciones que se deben cumplir para que la salida sea válida (ESRI, 2016).

ESRI con su programa ArcMap Geostatistical Analyst ofrece muchos métodos de interpolación diferentes. Cada uno de ellos tiene cualidades únicas y proporciona informaciones diferentes los métodos proporcionan una información similar; en otros, la información puede ser muy distinta (ESRI, 2016). En el tabla 1, se presentan los diferentes métodos de interpolación en el programa ArcMAP.

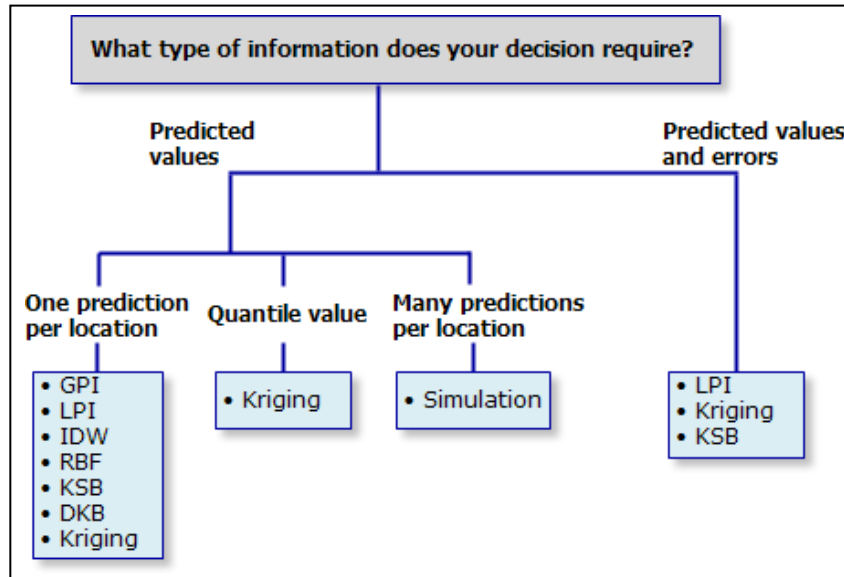
Tabla 1. Métodos de interpolación en ESRI

Abreviatura	Nombre del método
GPI	Interpolación polinómica global.
LPI	Interpolación polinómica local.
IDW	Distancia inversa ponderada.
RBF	Funciones Kernel con barreras.
DKB	Interpolación de difusión con barreras.
Kriging	Ordinario, simple, universal, indicador, de probabilidad, disyuntivo y Kriking bayesiano empírico.
Simulación	Simulación gaussiana de estadísticas geográficas basadas en un modelo de Kriging simple.

Fuente: Elaborado con base en ESRI, 2016.

El primer árbol (figura 4), sugiere métodos en función de la capacidad que estos tienen de generar predicciones o predicciones y errores asociados.

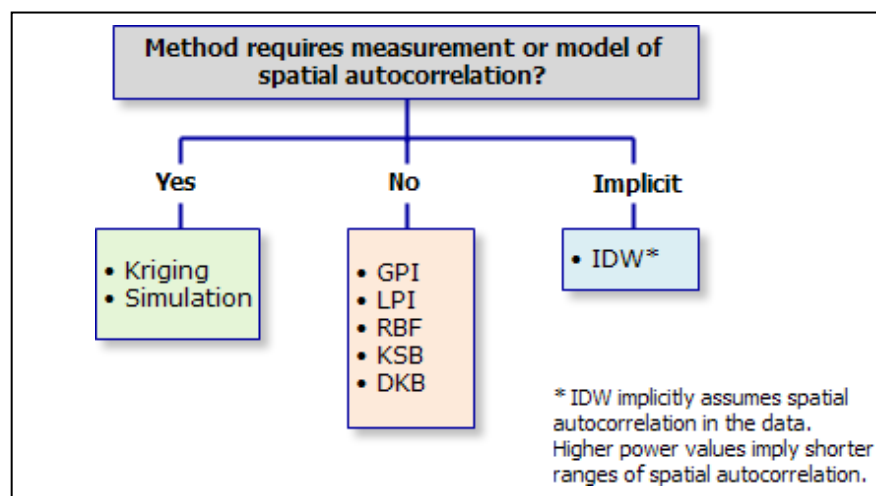
Figura 4. Árbol según la capacidad de generar predicciones



Fuente: ESRI, 2016.

Algunos métodos requieren un modelo de autocorrelación espacial para generar valores predichos, pero otros no. Un modelo de autocorrelación espacial exige definir valores de parámetros adicionales y ajustar un modelo a los datos de forma interactiva (ver figura 5).

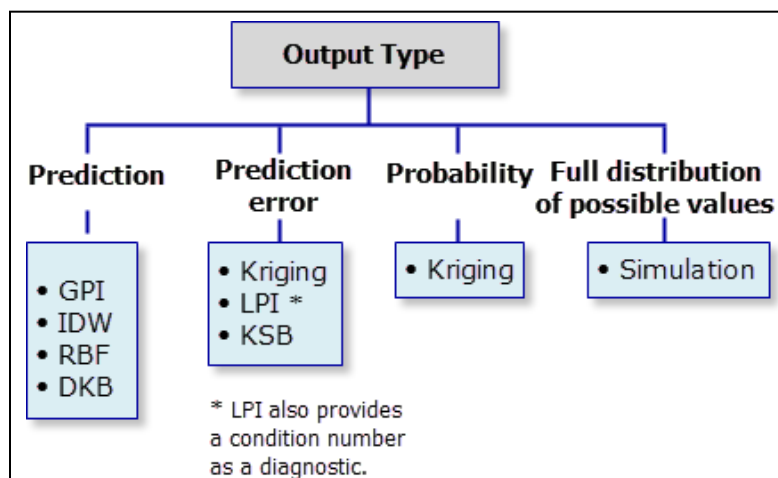
Figura 5. Árbol si el método requiere medición o correlación espacial del modelo



Fuente: ESRI, 2016.

Distintos métodos generan diferentes tipos de salidas y esa es la razón por la que debe decidir el tipo de información que necesita generar antes de crear el modelo de interpolación (ver figura 6).

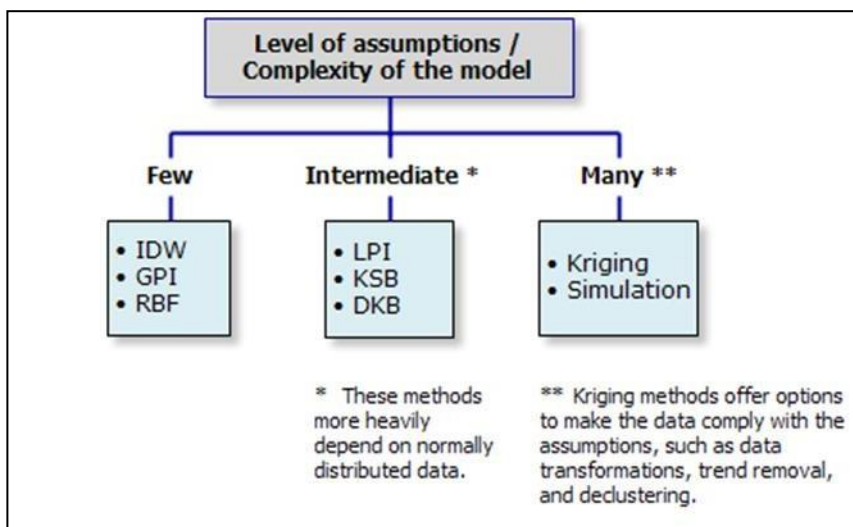
Figura 6. Árbol según salida de información



Fuente: ESRI, 2016.

Los métodos de interpolación difieren en sus niveles de complejidad, que se puede medir por el número de suposiciones que se deben cumplir para que el modelo sea válido (ver figura 7).

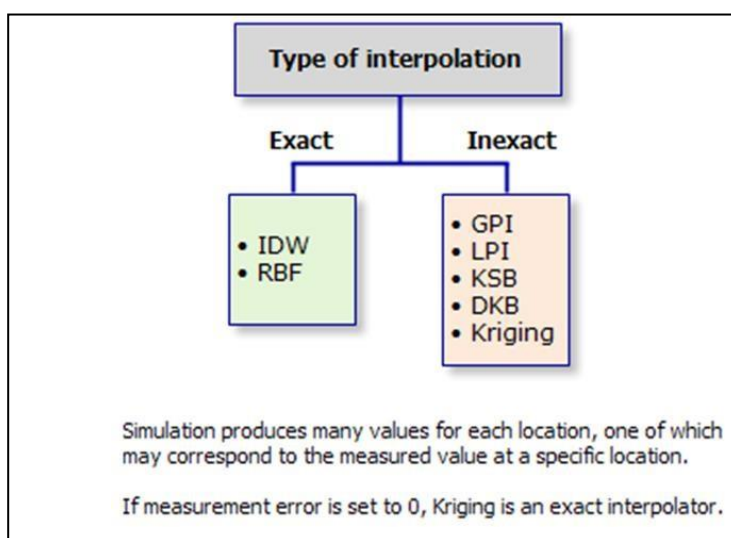
Figura 7. Árbol según cantidad de supuestos y complejidad



Fuente: ESRI, 2016.

Algunos interpoladores son exactos (en cada ubicación de datos de entrada, la superficie tendrá exactamente el mismo valor que el valor de los datos de entrada), mientras que otros no lo son. Una replicación exacta de los datos de entrada puede ser importante en algunas situaciones (ver figura 8).

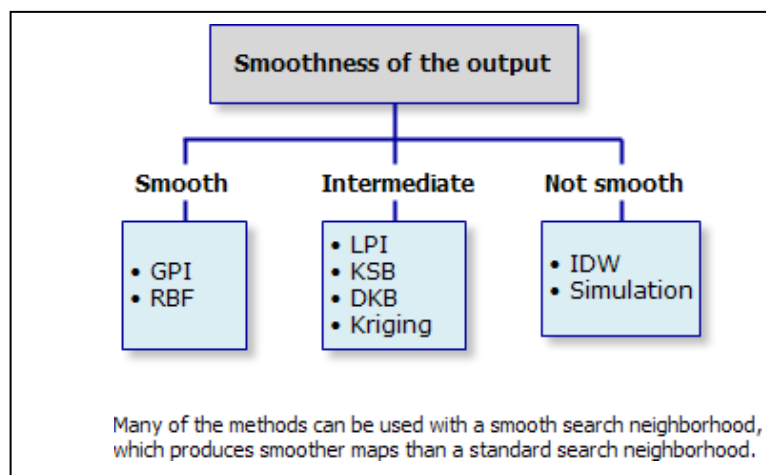
Figura 8. Árbol según exactitud de sus puntos



Fuente: ESRI, 2016.

Algunos métodos producen superficies que son más suaves que las generadas por otros. Las funciones de base radial son suaves por definición, por ejemplo. Una vecindad de búsqueda suave producirá superficies más suaves que una vecindad de búsqueda estándar (ver figura 9).

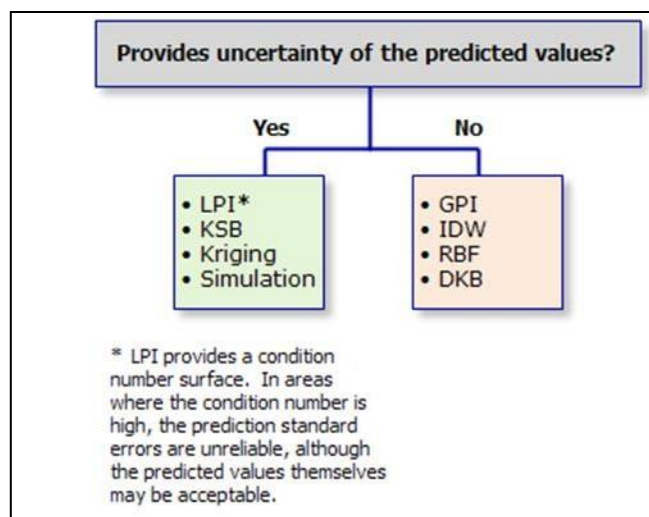
Figura 9. Árbol según suavidad de salida de datos



Fuente: ESRI, 2016.

Para algunas decisiones, es importante considerar no solo el valor predicho para una ubicación, sino también la incertidumbre (variabilidad) asociada con esa predicción. Algunos métodos proporcionan medidas de incertidumbre, otros no lo hacen (ver figura 10).

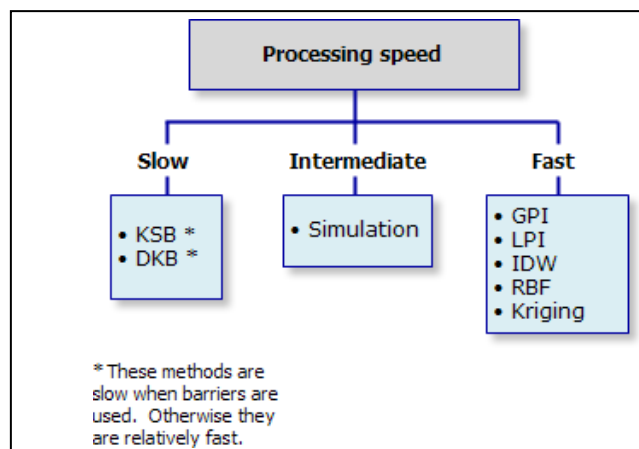
Figura 10. Árbol según la predicción de medidas de incertidumbre



Fuente: ESRI, 2016.

Por último, la velocidad de procesamiento puede ser un factor en el análisis. En general, la mayoría de los métodos de interpolación son relativamente rápidos, salvo cuando las barreras se usan para controlar el proceso de interpolación (ver figura 11).

Figura 11. Árbol según velocidad de análisis



Fuente: ESRI, 2016.

6.5 Conceptos de geoestadística

6.5.1 Estadística espacial

Es la reunión de un conjunto de metodologías apropiadas para el análisis de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios (puntos del espacio o agregaciones espaciales) de una región (Gómez y Parra, 2012).

6.5.2 Geo estadística

La geoestadística se refiere al conjunto de técnicas estadísticas utilizadas para el estudio de variables numéricas distribuidas en el espacio y tiempo. La geoestadística se ha convertido en una herramienta útil para explicar la variación de propiedades en el espacio y su uso se ha generalizado recientemente donde se analizan hechos geográficos, debido a la posibilidad de conocer, entre otros, el rango de influencia de la propiedad, estimar su valor en sitios donde no existe información y, por último, calcular el error de la estimación efectuada. El uso de esta herramienta se fundamenta en el cálculo de la semivarianza y el semivariograma (González et al., 2007).

6.5.3 Variable regionalizada

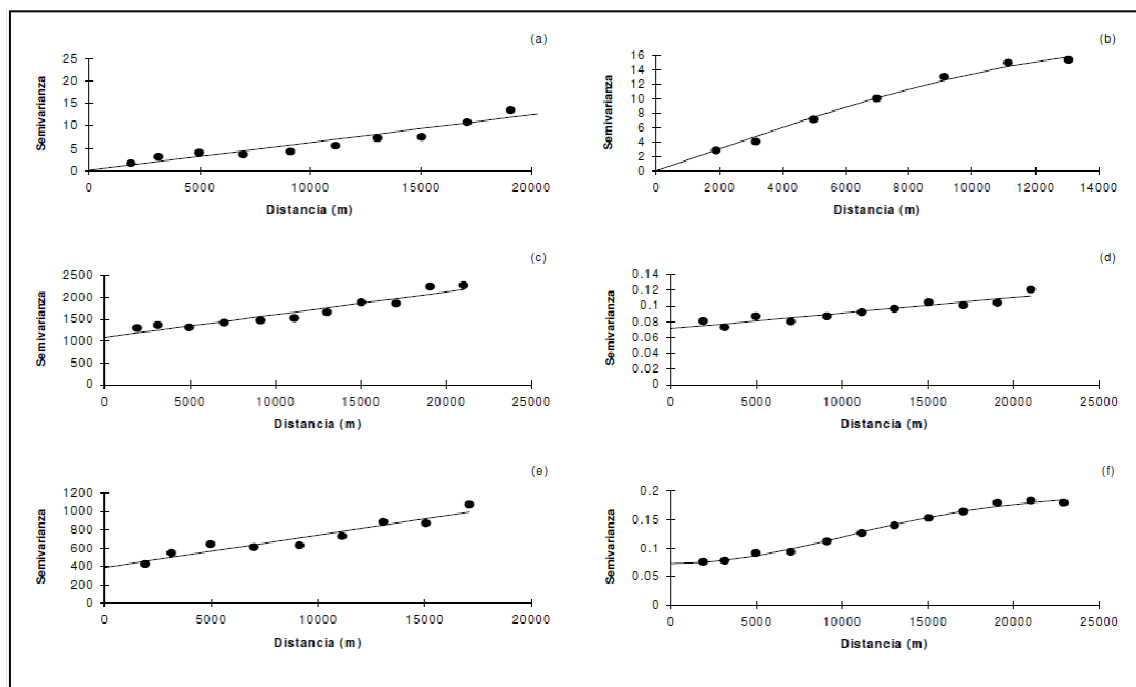
Se nombra como variable regionalizada $f(x)$ a la variable distribuida en el espacio de manera tal que presenta una estructura espacial de correlación. La teoría de la variable regionalizada supone que la variación espacial de cualquier atributo puede ser obtenida de la siguiente manera (Gómez y Parra, 2012):

- La adición de un componente estructural, en que los datos no son independientes de su ubicación geográfica y que puede expresarse como un valor medio constante (tendencia).
- Un componente aleatorio espacialmente correlacionado en que los datos varían irregular e imprevisiblemente.
- Un error residual no correlacionado.

6.5.4 Semivarianza

La semivarianza es una medida de la similitud que existe entre observaciones situadas a una determinada distancia (González et al., 2007). En la figura 12 se muestra un ejemplo de semivarianza.

Figura 12. Ejemplo de gráfico de semivarianza

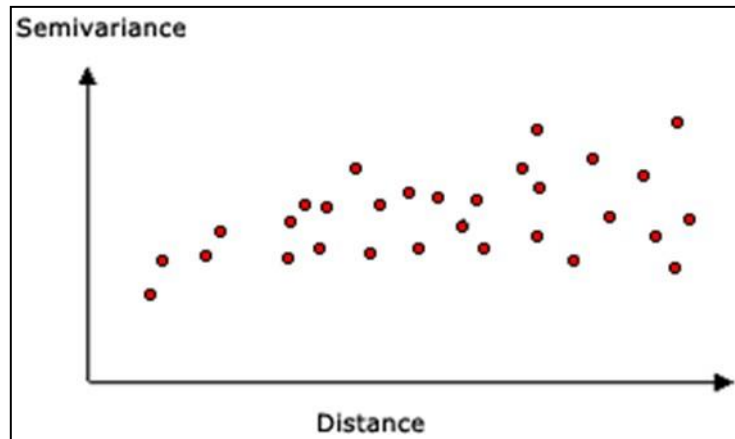


Fuente: Henao,, 2021.

6.5.5 Semivariograma

Un semivariograma mide el grado de autocorrelación entre los valores de un mismo atributo; describe cómo la semivarianza de las observaciones cambia con la distancia, es decir, representa la tasa media de cambio de un atributo con la distancia, describe su forma, el patrón de variación espacial en términos de magnitud, escala y aspecto general. El semivariograma empírico es un gráfico de los valores de semivariograma promediados en el eje Y, y la distancia (o intervalo) en el eje X (ESRI, s.f.).

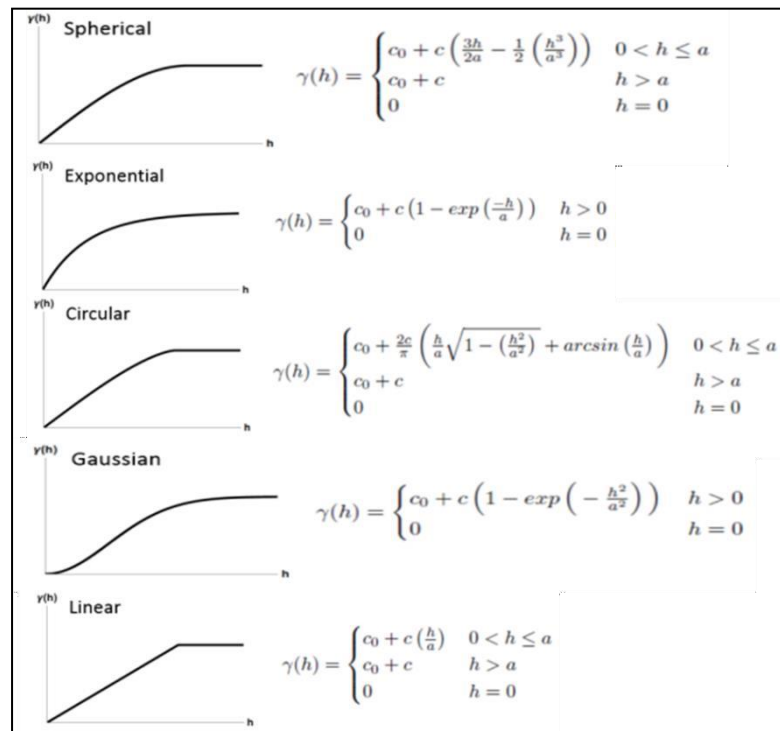
Figura 13. Ejemplo de gráfico de semivariograma empírico



Fuente: ESRI, s.f.

La autocorrelación espacial cuantifica un principio básico de la geografía: las cosas más cercanas son más parecidas que las cosas más separadas entre sí. Existen diferentes modelos de semivariogramas los cuales influyen en la predicción de los valores desconocidos (ESRI, s.f.).

Figura 14. Ejemplo de gráfico de semivariograma empírico



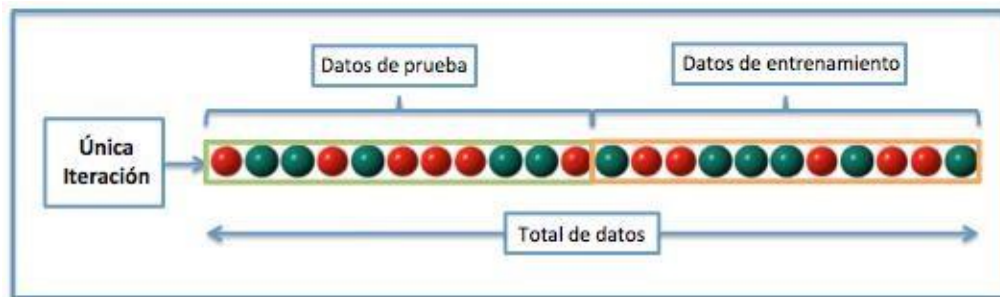
Fuente: ESRI, s.f.

6.6.6 Validación cruzada

Consiste en que los valores de sitios medidos son eliminados del conjunto de datos, uno a la vez. En los software SIG la herramienta de validación cruzada elimina una ubicación de datos y predice los datos asociados utilizando los datos del resto de las ubicaciones. El uso principal de esta herramienta es comparar el valor predicho con el valor observado a fin de obtener información útil sobre algunos de los parámetros del modelo (ESRI, 2016).

Las estadísticas más frecuentemente utilizadas para comparar las técnicas de interpolación son: el coeficiente de correlación entre los valores medidos y estimados del atributo, el error medio (ME), el error medio absoluto (MAE), y la raíz de la media de los errores al cuadrado o error medio cuadrático (RMSE) (ESRI, s.f.). En la figura 15 se presenta el funcionamiento de la validación cruzada.

Figura 15. Funcionamiento de la validación cruzada



Fuente: ESRI, s.f.

6.7.7 Estadísticos

La mayoría de estudios científicos se decantan por una evaluación de los resultados cualitativa, y en aquellos dónde se cuantifica el análisis optan por el uso de estadísticos simples como el error cuadrático medio, el error absoluto medio, el error absoluto medio normalizado y el sesgo (Jorba, 2005).

Éstos estadísticos permiten medir la precisión de la simulación, por precisión se entiende el promedio del grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados y valores observados. Por valores observados se entiende aquellos obtenidos en puntos de medición (Jorba, 2005).

- **Coefficiente de correlación lineal.** Este parámetro proporciona el grado de relación lineal que existe entre dos variables Φ y Φ_{obs} , donde a cada valor de Φ le corresponde uno de Φ_{obs} (López, 2009). La expresión para calcularla es:

$$\text{Correlación} = \frac{\sum_{i=1}^N (\Phi_i - \bar{\Phi}) (\Phi_{iobs} - \bar{\Phi}_{obs})}{(N-1) S_{\Phi} S_{\Phi_{obs}}}$$

Dónde;

Φ , representa los valores pronosticados;

Φ_{obs} , valores observados,

S_{Φ} y $S_{\Phi_{obs}}$, las desviaciones estándar y N el número total de datos.

En los siguientes estadísticos Φ y Φ_{obs} tienen el mismo significado.

- **Error cuadrático medio (Root Mean Square Error, RMSE).** Indica el grado de correspondencia promedio entre pares individuales de valores pronosticados y observados (López, 2009).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})^2}{N}}$$

Donde;

Φ_i , valor pronosticado para la celda i;

Φ_{iobs} , valor observado para la celda i,

N , número de valores analizados.

- **Error Absoluto Medio (Mean Absolute Error, MAE).** Es una medida de la cercanía entre los valores pronosticados y los observados (López, 2009).

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|\Phi_i - \Phi_{iobs}|}{N}$$

- **Error Absoluto Medio Normalizado (Normalized Mean Absolute Error, NMAE).** Similar al MAE, pero aquí se toma en cuenta el peso del error respecto al rango de variación de la variable medida (López, 2009).

$$NMAE = \sum_{i=1}^N \frac{|\Phi_i - \Phi_{iobs}| / |\Delta\Phi_{obs}|}{N}$$

Donde;

$$\Delta\Phi_{obs} = |\max(\Phi_{obs}) - \min(\Phi_{obs})|,$$

representa el rango de variación de los datos observados.

- **Sesgo (Mean Error o BIAS).** Proporciona información sobre la tendencia que tiene el modelo al pronosticar una variable, es decir, sobrestimar o subestimar (López, 2009).

$$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{(\Phi_i - \Phi_{iobs})}{N}$$

7. MARCO REFERENCIAL

7.1 Área de estudio

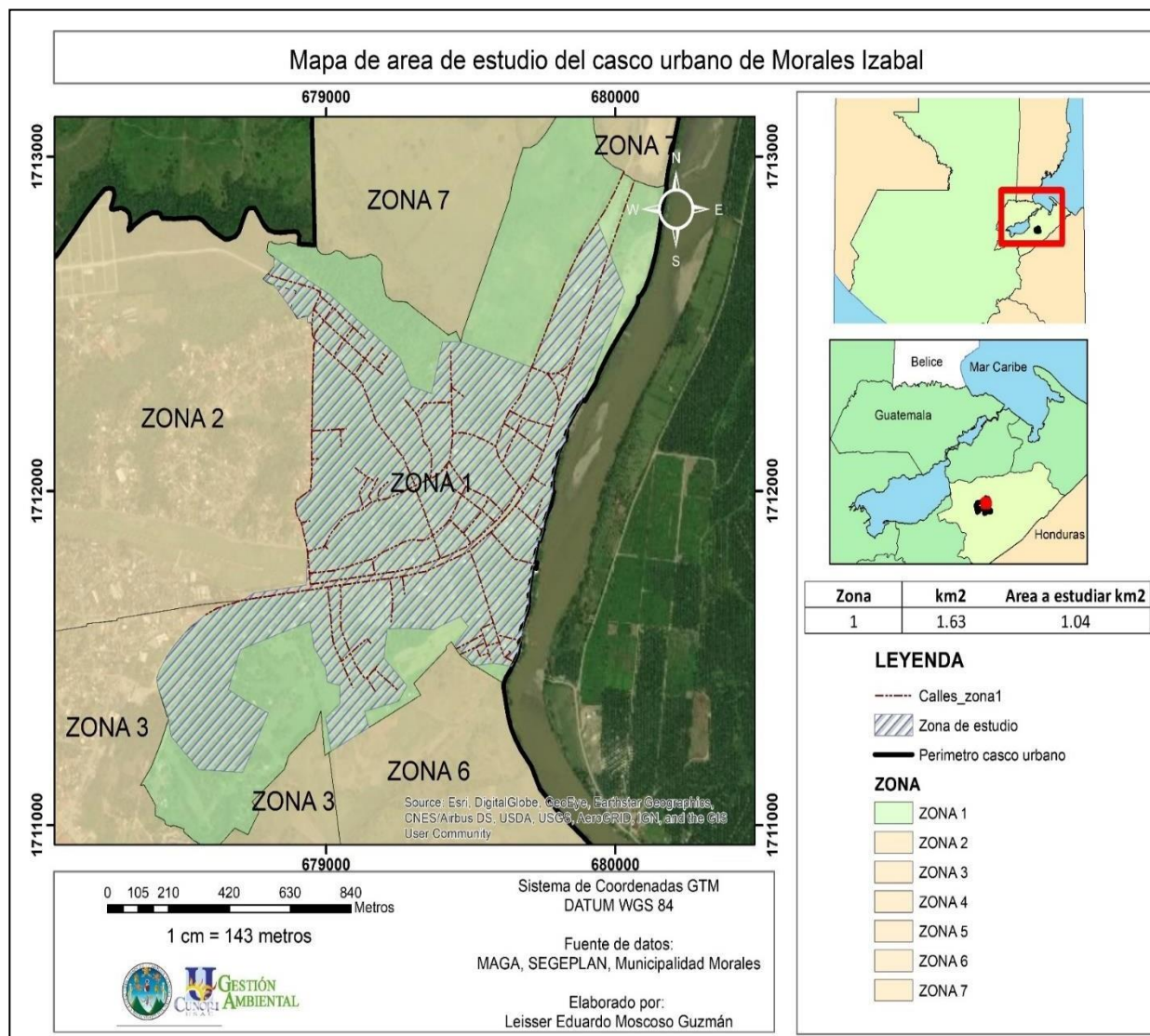
El municipio de Morales se encuentra ubicado en la zona este del departamento de Izabal, cuenta con una población total de 100,361 habitantes según datos del último censo nacional realizado en 2018 (INE, 2018), de los cuales el 24% de la población vive en la zona urbana, cabecera municipal de Morales, Izabal, lo que correspondería a 23,855 habitantes, siendo el segundo municipio más poblado del departamento de Izabal.

Según la Municipalidad de Morales, Izabal, a través del análisis de sistemas de información geográfica, se determinó que el área del casco urbano de la cabecera municipal de Morales es de 19.32 km² aproximadamente, la cual está comprendida en 7 zonas y 32 barrios distribuidas en toda el área.

El casco urbano del municipio de Morales, se encuentra en su totalidad en la cuenca del Río Motagua, dentro de la subcuenca del Río San Francisco, y la subcuenca denominada como área de captación del Río Motagua, ubicado a aproximadamente 42 metros sobre el nivel del mar, y mantiene un clima tropical húmedo, con días generalmente cálidos en la mayor parte del año, con temperatura promedio de 35 grados centígrados (°C), y tiene una precipitación anual de 2,000 mm, que se precipitan principalmente en los meses de junio a noviembre, mientras que, en los meses de diciembre a mayo, siempre precipita solo que en una menor medida (Consejo Municipal de Desarrollo del municipio de Morales, 2010) .

Para el análisis de los métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido se escogió la zona 1 del casco urbano con un área de 1.63 km², debido a que es la zona con mayor actividad principalmente comercial y de tránsito vehicular, lo que repercute en mayores niveles sonoros. Se observa el área de estudio en el casco urbano del municipio de Morales, Izabal (ver figura 16).

Figura 16. Mapa del área de estudio

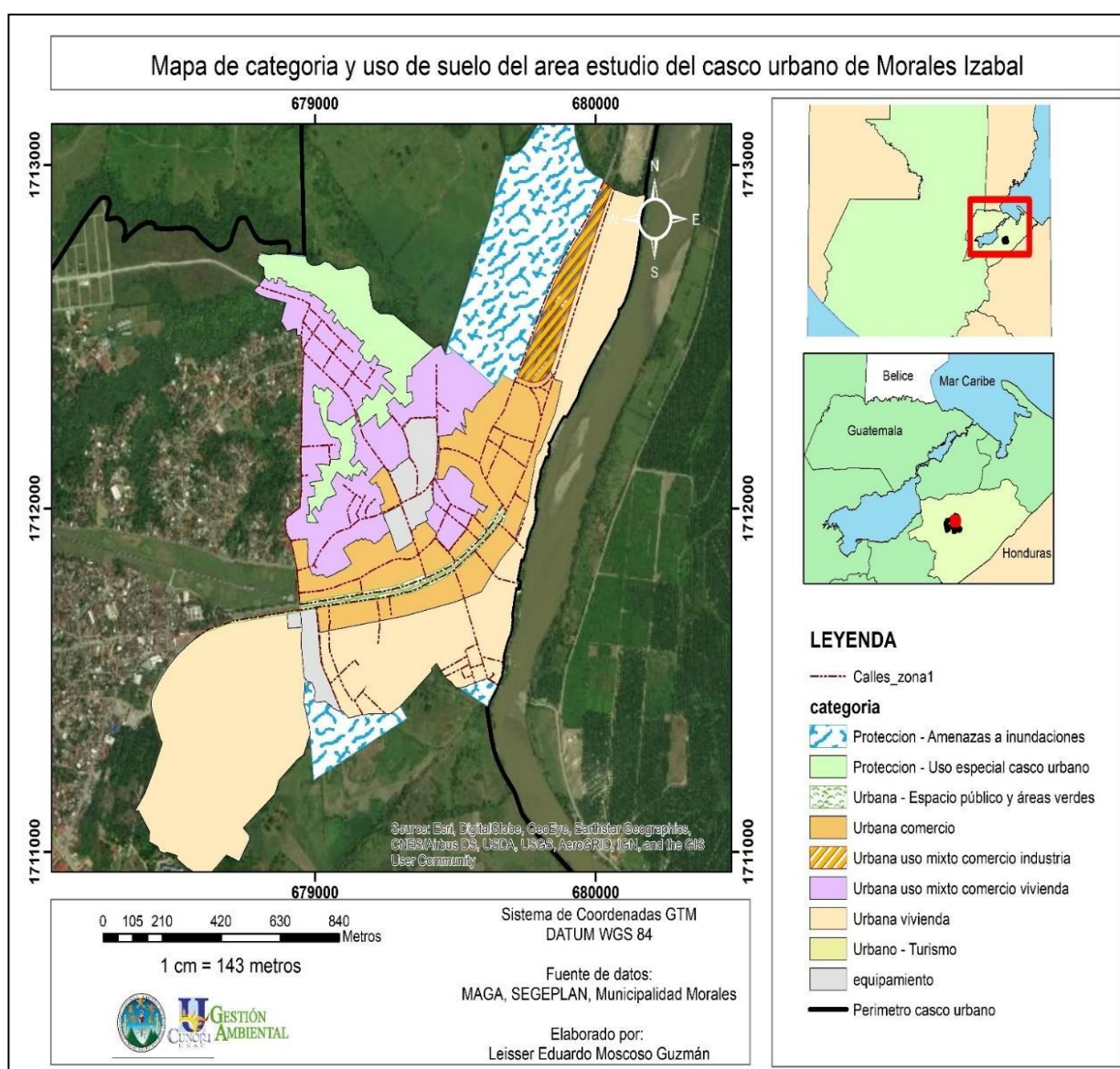


Fuente: Elaboración propia, 2020.

7.2 Uso del suelo

En el área de estudio se concentra la mayor parte de actividad comercial, peatonal, recreativa, educativa, administrativa del casco urbano, el cual se encuentra influenciada por alto tráfico vehicular particular y transporte pesado, debido a la gran cantidad de comercios, iglesias, centros educativos e industria del área, sin embargo, también existen zonas verdes, y pantanos en todo el casco urbano. Se observa los tipos de uso de suelo en el área de estudio de la zona 1 del casco urbano de Morales (ver figura 17).

Figura 17. Mapa de categoría y uso de suelo del área de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2020.

7.3. Estudios a nivel nacional

El estudio realizado por el Departamento de Ingeniería para el año 1982, comprendió una serie de análisis de ruido en las distintas zonas de la ciudad de Guatemala. La metodología utilizada fue la de escoger al azar seis puntos ubicados en el eje sur-norte de la ciudad, comenzando desde el Aeropuerto “La Aurora” hasta el Parque Central. Los puntos considerados fueron el Boulevard Liberación al concesionario frente de Volkswagen, las cercanías del Hospital de Traumatología del IGSS, la sexta avenida de la zona 1, la calle de doble vía frente a la Municipalidad y por último las inmediaciones de la Empresa Eléctrica en la zona. Los resultados establecieron que, de los 1,090 datos obtenidos, el punto con mayor nivel de ruido correspondió al Boulevard Liberación de la zona 10 con 106 dB registrados entre las 7:30 y 8:00 horas con un valor mínimo de 61 dB. Los restantes puntos alcanzaron valores superiores promedios superiores a 85 dB (España, 2015).

De acuerdo al estudio realizado por Santos (2003) en la Facultad de Ingeniería de la universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), en el cual se efectuó la medición de los niveles de ruido registrados en los corredores de la Facultad de Ingeniería de la USAC, los cuáles presentaban niveles superiores a los 66 decibeles, suficientes para afectar la audición, visión y concentración, el sueño y el peristaltismo intestinal.

Otro estudio se realizó, ciudad de Chiquimula por España en el año 2015, donde se determinaron los niveles sonoros generados en la zona 1, durante 3 horarios distintos, en 3 meses, realizando el muestreo en 12 puntos distribuidos por cuadrícula. Como resultado se determinó que el nivel sonoro promedio registrado en la zona 1 varía entre 69 y 80 dB, lo que sobrepasa el límite de 70dB permitidos en una zona comercial, en casi todos los puntos, así como 55 dB para zonas residenciales.

A pesar de que ya empiezan a existir investigaciones de los niveles sonoros a nivel nacional, no existe una investigación sobre la metodología de análisis geoespacial en entornos urbanos del país.

7.4. Estudios a nivel mundial

En el ámbito mundial existen gran cantidad de investigaciones, mediciones y mapeo de niveles sonoros, que se han generado a través de varias metodologías distintas de análisis de datos, las cuales deben estudiarse y determinar según las variables sus niveles de error, y beneficio-costos que representan. Como referencia se puede mencionar investigaciones concernientes al análisis de datos espaciales, para la generación de mapas de ruidos, que a continuación se presenta.

En Colombia, Murillo et al. (2012) presentaron un estudio efectuado con el propósito de analizar la congruencia de los métodos de interpolación en la generación de mapas de ruido, donde realizaron mediciones sonoras y utilizaron los métodos de interpolación de kriging e IDW en el software de SIG ArcGis, donde se realizó un análisis geoestadístico para determinar qué modelo presentaba resultados más precisos, llevando a cabo una valoración del mapa de ruido obtenido y comparándola con la legislación colombiana, en donde se concluyó que de ambos métodos de interpolación, el de kriging se correlaciona de mejor manera con los estadísticos de los puntos medidos.

También en Colombia, Grijalba (2018) examinó la influencia de la variabilidad espacio temporal del paisaje sonoro en la calidad de entornos acústicos de una pieza urbana de la ciudad de Popayán-Colombia, prestando particular atención al vínculo de la experiencia sonora del habitante de la ciudad con el ruido ambiental y el contexto urbano adyacente, donde a través de un análisis geoestadístico determinó que el método de interpolación de kriging era el que le presentaba menor error, con lo que los valores físicos y perceptuales del paisaje sonoro de una pieza urbana fueron registrados y comparados mediante la recolección de datos in situ.

8. MARCO METODOLÓGICO

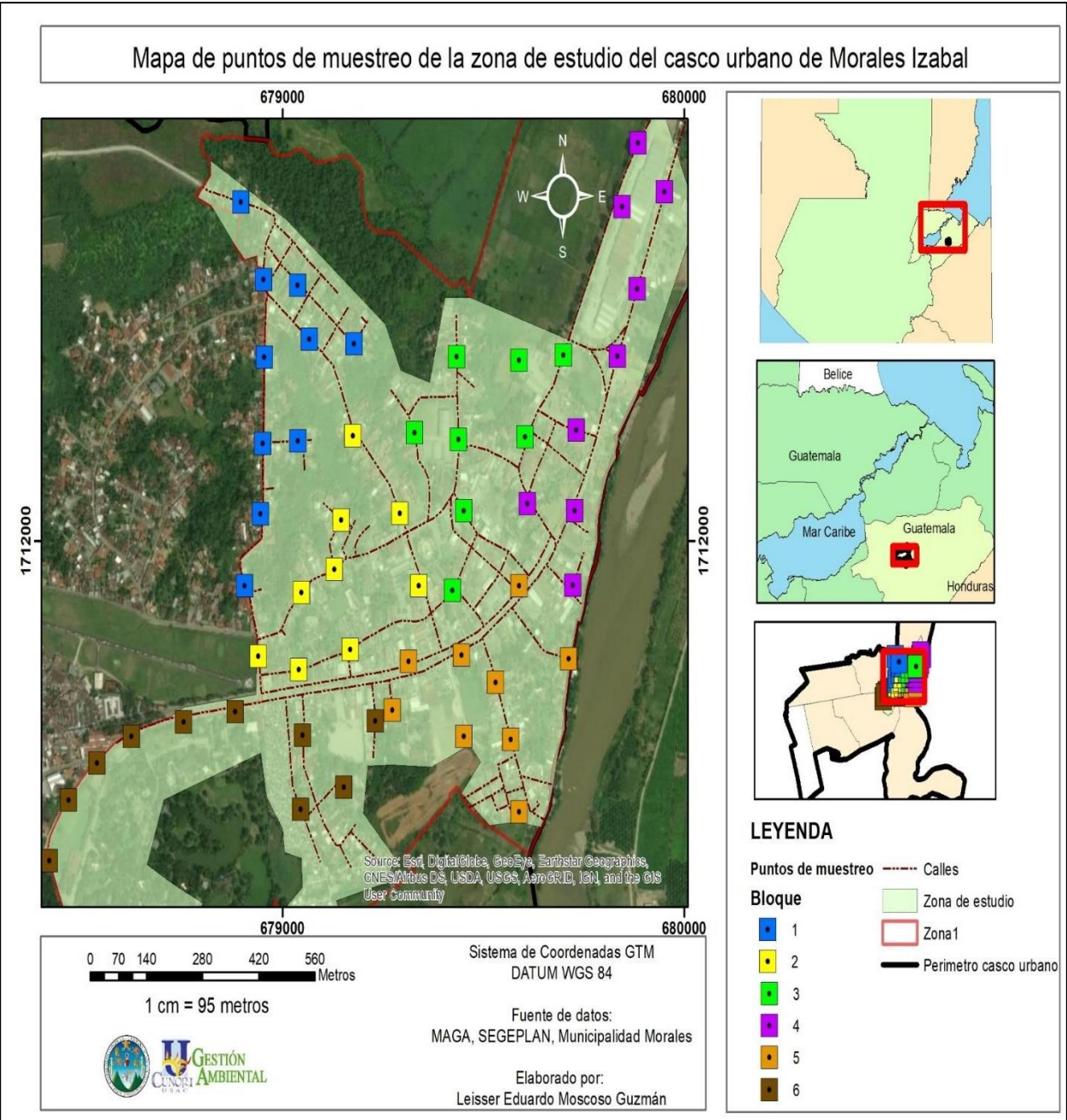
8.1 Generación de información de los niveles sonoros emitidos en el área de estudio para analizar su variación temporal

8.1.1 Definición de cantidad y distribución de puntos de monitoreo

Para la selección de los puntos de medición se utilizó el método basado en el trazo de cuadrículas (retículas o rejillas) muestreo sistemático no lineal, considerándose dos criterios:

- Basado en la experiencia de los modelos geoestadísticos, que considera que el número mínimo necesario de puntos para representar adecuadamente la distribución espacial de una variable determinada es 50, para enriquecer los datos estadísticos se realizaron un 10% más (Chilés y Delfiner, 1999).
- La delimitación geográfica del área objeto de estudio se realizó a partir de la magnitud de dicha área, se definió un número de cuadrículas regulares para realizar la evaluación en cada una (Yepes et al., 2009).
- El área objeto del presente estudio fue la zona urbana del casco urbano que tiene una superficie de 1.63 km², de los cuales solo se midieron 1.19 km², obteniendo una cuadrícula de 55 casillas, cada una con un área de 0.138 Km².
- Cada centroide de cada casilla fue adaptado para ser punto de monitoreo, modificando de la manera más estratégica o conveniente el punto de muestreo según fuera necesario (Apéndice 2).
- Finalmente se elaboró un mapa en donde se encuentran establecidos cada uno de los puntos de monitoreo en el área de estudio de la zona 1 del municipio de Morales. Se observa el mapa de rejilla y puntos de monitoreo (ver figura 18).

Figura 18. Mapa de puntos de monitoreo en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2020.

En la tabla 2 se presenta la ubicación geográfica de los puntos de monitoreo en la zona de estudio en el sistema de coordenadas GTM.

Tabla 2. Ubicación geográfica de los puntos de monitoreo en la zona de estudio del casco urbano de Morales

No. Punto	Coordenadas GTM		No. Punto	Coordenadas GTM	
	X	Y		X	Y
1	678951	1712179	29	679129	17
2	678538	1711592	30	679339	
3	678420	1711413	31	67942	
4	678955	1712337	32	679	
5	678467	1711525	33	6	
6	678953	1712480	34		
7	679045	1711508	35		
8	679152	1711548	36		
9	679589	1711504			
10	678623	1711642			
11	678753	1711669			
12	678882	1711687			
13	679050	171164			
15	679273	1711			
16	679451	17			
17	679568				
18	679834				
19	6789				
20	6				
21					
22					
23					
2					

Fuente: Elaboración propia, 2020.

8.1.2 Selección del indicador del nivel sonoro

Se seleccionó el indicador denominado nivel sonoro equivalente continuo $Leq(A)$ que es el nivel sonoro que permanece en el área durante un tiempo específico y que se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$Leq(A) = 10 * \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{Li(A)/10} \right]$$

Donde n es el período de monitoreo, en este caso de 10 minutos, los cuales son representativos de una hora, tal como se explica más adelante; $Li(A)$ es el nivel sonoro máximo o mínimo obtenido en un punto determinado en cada minuto durante los 10 minutos de monitoreo.

De tal forma, por cada período monitoreado puede obtenerse un valor en decibeles, que representa el nivel equivalente a los niveles sonoros registrados en dicho período.

8.1.3 Toma de muestra de los niveles sonoros

a. Equipo para medir los niveles sonoros

Para la determinación de los niveles de presión sonora se empleó un Sonómetro digital portátil Marca KASUNTEST KT-202, tipo 2, ajustado en ponderación con escala A y Respuesta Lenta. El sonómetro tiene una precisión, dependiendo de la frecuencia de la fuente a medir, de aproximadamente $\pm 1.5\text{dB}$. El rango de medición del equipo es de 30 a 130 dB.

Para la obtención de las coordenadas de ubicación, se contó con un equipo GPS Garmin eTrex 30x, que permite obtener los datos en coordenadas GTM en metros. Esta información es muy importante para poder graficar los puntos y elaborar los mapas acústicos.

b. Consideraciones básicas para el posicionamiento de instrumento

Se consideraron varios requisitos indispensables para no afectar la calidad de los resultados obtenidos de la medición, los cuales fueron los siguientes:

- Realizar mediciones con una distancia entre 1.5 m y 2m de las fachadas.
- Colocar el instrumento (micrófono) a favor del viento en condiciones climáticas favorables, se debe evitar tomar mediciones cuando el viento es fuerte, sin neblina o lluvia fuerte.
- Colocar el sonómetro entre 1.2 y 1.5 sobre el nivel del suelo.
- El operario se debe ubicar a 0.50 m lejos del sonómetro para no interferir con la medición.

c. Horario para monitoreo de niveles sonoros

Los 55 puntos de monitoreo se agruparon en 6 bloques con la finalidad de obtener un mejor manejo los mismos, elaborando una distribución de las mediciones que permita que las muestras tomadas en campo sean representativas en los días y horarios respectivos. En la tabla 3 se presenta la distribución de puntos de monitoreo por bloque.

Tabla 3. Distribución de puntos de monitoreo por bloques

Bloque	Puntos de monitoreo	Cantidad
A	1 a 9	9
B	10 a 18	9
C	19 a 27	9
D	28 a 36	9
F	37 a 45	9
G	46 a 55	10
Total		55

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Para efectuar el monitoreo se establecieron 4 días por semana en un total de 6 semanas consecutivas; los días designados para la actividad de monitoreo son lunes, jueves, viernes y domingo, por considerarse con mayor potencial de generación de sonido excesivo; así mismo, se seleccionaron tres horarios considerando las actividades desarrolladas en el área de investigación durante la mañana, tarde y noche. En la tabla 4 se observan los horarios establecidos para efectuar el monitoreo de los niveles sonoros.

Tabla 4. Horarios y días establecidos para monitoreo de los niveles sonoros en cada bloque de puntos de monitoreo

Horarios	Semana 1				Semana 2				Semana 3				Semana 4				Semana 5				Semana
	L	M	J	S	L	M	J	S	L	M	J	S	L	M	J	S	L	M	J	S	
6:00 - 8:00	1	3	5																		
12:00 - 14:00																					
17:00																					

Fuente: Elaboración propia, 2020.

8.1.5 Método para la medición de los niveles sonoros

De acuerdo a investigaciones realizadas por la Escuela Politécnica del Ejercito (Gómez y Parra, 2012) sobre la generación de un modelo de predicción de ruido aplicando técnicas geoestadísticas en las parroquias de San Rafael y Sangolquí del Cantón Rumiñahui, así como la metodología de elaboración de mapas acústicos como herramienta de gestión del ruido urbano de la Universidad de Medellín (Colombia); se demuestra que midiendo 10 minutos de cada hora se pueden obtener resultados aceptables y representativos.

Para medir los niveles sonoros en cada uno de los puntos establecidos en la zona 1 del casco urbano de Morales se utilizó un sonómetro, el periodo de medición fue de 10 minutos de acuerdo al horario designado para cada punto de monitoreo.

Los datos fueron registrados y almacenados en el sonómetro, ya que dicho instrumento dispone de la función para guardar datos obtenidos *in situ*. Es importante mencionar que el sonómetro mide los niveles sonoros (dB) por segundo para obtener una mayor precisión en los resultados.

Posteriormente los datos se descargaron mediante el software específico del dispositivo, que permite la visualización gráfica y numérica del registro y su traslado al programa de Microsoft Excel, para calcular los resultados de la ecuación específica descrita anteriormente.

Además, se anotaron observaciones en una boleta de campo (Apéndice 1). para registrar los fenómenos desarrollados en el lugar durante el momento de la medición, debido a que algunas actividades que se desarrollaron en el lugar pueden tener un impacto directo en el incremento de los niveles sonoros, evidenciando estas actividades en fotografías o videos cuando fue requerido (Apéndice 12).

8.1.6 Análisis de los niveles sonoros

- **Determinación del promedio general de niveles sonoros registrados en el área de estudio**

Para realizar dicho análisis se realizó un promedio aritmético en el programa de Microsoft Excel, con todos los datos obtenidos en los tres horarios y cuatro días, durante el periodo de estudio.

- **Elaboración de tabla resumen del monitoreo**

Los datos obtenidos del monitoreo efectuado, ya aplicada la fórmula indicada del indicador de ruido seleccionado, se ingresaron a un cuadro en el cual se puede visualizar el dato correspondiente al horario y al día de monitoreo, así mismo, dicha tabla contiene las coordenadas geográficas donde se ubicó el punto de muestreo, la dirección de referencia y las actividades predominantes que se desarrollan en el lugar de cada punto establecido como punto de monitoreo (Apéndice 1).

- **Análisis temporal de los niveles sonoros respecto a las variables, día y horario**

Se elaboraron gráficas con los valores promedio de las variables punto, mes, día y horario con las cuales posteriormente se determinaron los horarios, días, meses puntos que presentan mayor y menor nivel sonoro. En cada una de las gráficas se incluyó también los valores recomendados por la OMS para zonas residenciales y comerciales, como datos de referencia (Anexo 1).

8.2 Definición de métodos de interpolación a utilizar en el área de estudio

8.2.1 Identificación de métodos de interpolación

La información se obtuvo a través de ESRI, desarrolladora del programa para sistemas de información geográfica ArcGIS, donde describe las funciones y aptitudes de los métodos de interpolación disponibles en su aplicación; con base a la información recabada se listaron los métodos de interpolación disponible en los sistemas de información geográfica de esta desarrolladora.

8.2.2 Selección de tres métodos de interpolación

La selección de los métodos de interpolación se realizó a través de una matriz de priorización donde se listaron las características de cada método listado y así mismo se ponderó de acuerdo a la funcionalidad descrita para la elaboración de mapas de ruido, dando valores altos a las características más funcionales y valores bajos a las contrarias.

En la tabla 5 se observan los parámetros y los valores para la selección de los tres métodos de interpolación a utilizar para generar los mapas de niveles sonoros del área de estudio.

Tabla 5. Valoración de las características de los métodos de interpolación

Parámetro de uso			Valoración de variable
Capacidad de genera predicciones	Valores predichos	Una predicción por localización	2
		Valor cuantil	2
		Muchas predicciones por localización	1
	Valores y errores predichos		3
Requiere medición o correlación espacial del modelo	Sí		2
	No		1
	Implícito		3
Según salida de información	Predicción		3
	Error de predicción		2
	Probabilidad		2
	Distribución completa de posibles valores		1
Según cantidad de supuestos y complejidad	Pocas		3
	Intermedios		2
	Muchos		1
Según exactitud en sus puntos	Exactos		3
	Inexactos		1
Según suavidad de salida de datos	Suave		3
	Intermedia		2
	Sin suavizar		1
Según la predicción de medidas de incertidumbre	Sí		2
	No		1
Según velocidad de análisis	Lenta		1
	Intermedia		2
	Rápida		3

Fuente: Elaboración propia, 2020.

8.2.3 Comparación tres métodos de interpolación

La comparación de los métodos de interpolación se realizó mediante un análisis exploratorio, se utilizaron los datos obtenidos del monitoreo de niveles sonoros, aplicando la herramienta de geoestadística de la validación cruzada a los tres métodos de interpolación seleccionados, con el objeto de obtener valores pronosticados similares a los valores medidos.

La validación cruzada se realizó mediante el uso de indicadores estadísticos para pronósticos categóricos no escalables, como lo son: error cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE), error absoluto medio normalizado (NMAE), sesgo (BIAS) y el coeficiente de correlación.

Tabla 6. Indicadores estadísticos para la validación cruzada

Indicador estadístico		Descripción
Error cuadrático medio	RMSE	Calcula las diferencias en promedio entre los valores pronosticados y los observados. Los valores más bajos indican mejores resultados.
Error absoluto medio	MAE	Es el promedio del valor absoluto de la diferencia entre el pronóstico y la observación.
Error absoluto medio normalizado	NMAE	Se utiliza para tener en cuenta el peso del error respecto al valor de la variable medida.
Sesgo	BIAS	Proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, nos cuantifica el error sistemático del modelo.
Coeficiente de correlación	CC	La correlación es una medida del "grado de ajuste," o de similaridad o semejanza, entre el pronóstico y los patrones observados. La correlación valora el rango entre -1 y 1, donde 1 representa la correlación perfecta y cero no hay ninguna correlación

Fuente: Elaborado con base a Henao, 2021.

Con los datos obtenidos del análisis exploratorio se ingresan a una tabla donde se puede observar el valor del indicador correspondiente. Los resultados obtenidos de los indicadores estadísticos se compararon entre los 3 métodos por cada horario y día tomados, y se seleccionó el método con el menor error o sesgo.

Además, para determinar la congruencia de los datos obtenidos en los modelos de interpolación seleccionados y los datos levantados en campo, se realizó una comparativa entre los valores predichos y los valores medidos mediante medidas estadísticas como mínimo, máximo, rango, media y desviación estándar. En la tabla 7 se presentan los estadísticos utilizados para realizar la comparativa entre los valores predichos y los valores medidos.

Tabla 7. Estadísticos para comparativa entre valores predichos y valores medidos

Estadístico	Unidad de medida	Descripción
Mínimo	(dB)	Es el valor mínimo observado de un conjunto de datos pertenecientes a un universo.
Máximo	(dB)	Es el valor máximo observado de un conjunto de datos pertenecientes a un universo.
Rango	Unidad	Diferencia existente entre el valor máximo y el mínimo de una distribución de datos.
Media	(dB)	Muestra el valor central de los datos constituyendo una de las medidas de ubicación que más se utiliza
Desviación estándar	Unidad	Es una medida de la dispersión de los datos, cuanto mayor sea la dispersión mayor es la desviación estándar, cuanto más cercana al cero mejor será la desviación estándar.

Fuente: Elaboración propia, 2021

8.2.4 Elaboración de mapas

Mediante el programa ArcGIS versión 10.2.1 se elaboraron mapas con la finalidad de representar geoespacialmente los datos obtenidos del monitoreo de nivel sonoro utilizando los métodos de interpolación seleccionados que presentaron menor error y visualizar la problemática respecto a la contaminación por ruido de la zona 1 del casco urbano del municipio de Morales.

Además, se seleccionó el mejor método de interpolación para elaborar un mapa de niveles de ruido de acuerdo a los tipos de uso del suelo en el área de estudio para determinar la magnitud de la contaminación por ruido según los límites permisibles recomendados por la OMS para zonas comerciales y zonas de exterior habitable.

8.3 Lineamientos generales

Los lineamientos generales se formularon con base en los datos obtenidos del análisis de los niveles de ruido según los tipos de uso de suelo en el área de estudio. Para formular los lineamientos generales se consideraron los siguientes aspectos: innovación tecnológica, hábitos de uso de los equipos y aparatos generadores de sonido y la gestión del territorio.

- **Innovación tecnológica.** Se refiere a la implementación de instrumentos o equipos y estrategias para la medición de los niveles sonoros.
- **Modificación de hábitos.** Lineamientos orientados para la modificación de los niveles sonoros producto del uso de aparatos que generen ruido como bocinas y megáfonos empleados en actividades comerciales y de publicidad.
- **Gestión territorial.** Son lineamientos orientados a mejorar la gestión del territorio local enfatizando los niveles acústicos aceptables para un ambiente agradable.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 Comparación de tres métodos de interpolación

Se analizaron ocho métodos de interpolación espacial disponibles en el programa ArcGIS de Esri para seleccionar tres que permiten elaborar mapas de ruido con la mayor precisión posible en entornos urbanos. El software de ArcGIS describe las funciones y aptitudes de los métodos de interpolación.

9.1.1 Selección de tres métodos de métodos de interpolación

Según Murillo et al. (2012), cada método de interpolación busca representar adecuadamente el fenómeno bajo estudio y los resultados estadísticos estarán en función de las características del método a utilizar, por lo tanto, para la presente investigación se realizó una evaluación en base a una matriz elaborada de acuerdo a las características de cada método, la cual permitió evaluar los métodos de interpolación disponibles en el programa de ArcGIS mediante los parámetros establecidos. Estos parámetros de uso son: capacidad de generar predicciones, requerimiento de medición o correlación espacial del modelo, salida de información, cantidad de supuestos y complejidad, exactitud en los puntos, suavidad de salida de datos, capacidad de predicción de medidas de incertidumbre y velocidad de análisis.

En la matriz de priorización se listaron todos los métodos de interpolación y se ponderaron con números positivos del 1 al 3, las ventajas y funciones según los parámetros de uso de cada método de interpolación que brinda el programa ArcGIS de Esri, donde el valor “1” significa poco funcional, el valor “2” significa medianamente funcional, y el valor “3” significa muy funcional, los cuales al sumar el valor ponderado de cada parámetro da la priorización según su funcionalidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los tres métodos de interpolación seleccionados para su posterior comparación son: método de interpolación de Kriging, funciones de base radial (RBF), y distancia inversa ponderada (IDW). En la tabla 8 se observa a mayor detalle la ponderación para cada aptitud y funcionalidad de los métodos de interpolación evaluados en la matriz de priorización.

Tabla 8. Matriz de priorización de métodos de interpolación, valorados según la funcionalidad para realizar mapas de ruido en zonas urbanas

Parámetro de uso			Método de interpolación								Valoración de variable	
			GPI	LPI	IDW	RBF	KSB	DKB	Kriging	Simulación		
Capacidad de generar predicciones	Valores predichos	Una predicción por localización	2	2	2	2	2	2	2	1	Mayor valor, mayor capacidad generar predicciones y errores asociados	
		Valor cuantil	0	0	0	0	0	0	0	1		0
		Muchas predicciones por localización	0	0	0	0	0	0	0	0		1
	Valores y errores predichos		1	3	1	1	3	1	3	1		1
Requiere medición o correlación espacial del modelo	Sí		1	1	1	1	1	1	3	3	Mayor valor, más capacidad de ajustar el modelo y obtener mayor exactitud	
	No		1	1	0	1	1	1	0	0		
	Implícito		1	1	3	1	1	1	1	1		1
Según salida de información	Predicción		3	1	3	3	1	3	1	1	Mayor valor, más útil es el resultado para realizar mapas de ruido	
	Error de predicción		1	2	1	1	2	1	2	1		
	Probabilidad		0	0	0	0	0	0	1	0		
	Distribución completa de posibles valores		0	0	0	0	0	0	0	1		
Según cantidad de supuestos y complejidad	Pocas		3	1	3	3	1	1	1	1	Mayor valor más facilidad de usar	
	Intermedios		1	2	1	1	2	2	1	1		
	Muchos		0	0	0	0	0	0	1	1		
Según exactitud en sus puntos	Exactos		1	1	3	3	1	1	1	1	Mayor valor, mayor exactitud de información de entrada	
	Inexactos		1	1	0	0	1	1	1	0		
Según suavidad de salida de datos	Suave		3	1	1	3	1	1	1	1	Mayor valor, mayor detalle en la generación de mapas	
	Intermedia		1	2	1	1	2	2	2	1		
	Sin suavizar		0	0	1	0	0	0	0	0		
Según la predicción de medidas de incertidumbre	Sí		1	3	1	1	3	1	3	3	Mayor valor, mayor adaptabilidad en la generación de mapas	
	No		1	1	2	2	1	2	1	1		
Según velocidad de análisis	Lenta		0	0	0	0	1	1	0	0	Mayor valor, mayor rapidez de trabajo	
	Intermedia		1	1	1	1	1	1	1	2		
	Rápida		3	3	3	3	1	1	3	1		
Total			26	27	28	28	26	24	31	23		

Fuente: Elaboración propia, 2020.

9.1.2 Análisis exploratorio

La comparación de los tres métodos de interpolación seleccionados se realizó mediante un análisis exploratorio, donde se aplicó la validación cruzada de acuerdo a los indicadores estadísticos MAE, RMSE, EL NMAE, BIAS y el coeficiente de correlación, con el fin de identificar sesgos en las mediciones y en las tendencias de los datos obtenidos en el periodo de tiempo establecido en el monitoreo.

Para determinar el método que presenta menor error y evidencia una alta congruencia entre los datos estadísticos de los puntos predichos y los medidos, se realizaron interpolaciones utilizando la validación cruzada, obteniendo valores observados y valores predichos por cada variable estadística. A través del uso de matrices se compararon los resultados obtenidos con los indicadores estadísticos utilizados en los puntos de monitoreo de acuerdo al horario establecido, así como del promedio sonoro de cada día y mes, siendo un total de 17 comparaciones realizadas por cada variable estadística (Apéndice 5).

Mediante el procedimiento de validación cruzada se determinó que el método de interpolación kriging presenta los valores más altos de acuerdo a los indicadores establecidos, sin embargo, los métodos de interpolación evaluados no presentan una diferencia de error significativa. En la tabla 9 se observa los resultados obtenidos de la validación cruzada en los métodos de interpolación seleccionados.

Tabla 9. Comparación de los métodos de interpolación según indicadores estadísticos

Indicador Estadístico		Métodos de interpolación		
		Kriging	RBF	IDW
Error cuadrático medio	RMSE	7.307	7.549	7.479
Error absoluto medio	MAE	6.195	6.338	6.285
Error absoluto medio normalizado	NMAE	9.79%	10.05	9.97%
Sesgo	BIAS	0.051	0.08	0.197
Coeficiente de correlación	Coeficiente C.	0.276	0.245	0.206

Fuente: Elaboración propia, 2020.

9.1.3 Comparativa entre valores predichos y valores medidos

Como parte de la investigación se realizó una comparativa entre los valores predichos y valores medidos en campo para determinar la congruencia de los resultados obtenidos de los métodos de interpolación de kriging, IDW y RBF con realidad actual del área de estudio, para ello se utilizaron las medidas estadísticas de mínimo, máximo, rango, media y desviación estándar.

En la tabla 10, se observa que el método RBF e IDW presentan valores predichos más cercanos a los medidos, sin embargo, ambos métodos generan valores de celda promedio que son influenciados dependiendo de la cercanía con los puntos medidos, en comparación a kriging que genera superficies partiendo de la relación estadística de un conjunto de puntos.

Tabla 10. Comparación entre valores predichos y valores medidos de tres métodos de interpolación

Estadística	Método de interpolación	Valores		Diferencia
		Predichos	Medidos	
Mínimo (dB)	Kriging	58.02	47.82	10.20
	RBF	47.89		0.07
	IDW	51.3		3.48
Máximo (dB)	Kriging	71.45	82.01	-10.56
	RBF	82.02		0.01
	IDW	78.99		-3.02
Rango	Kriging	13.43	34.19	-20.76
	RBF	34.12		-0.07
	IDW	27.69		-6.50
Media (dB)	Kriging	65.37	64.96	0.54
	RBF	65.46		0.63
	IDW	65.47		0.64
Desviación estandar	Kriging	3.14	7.64	-4.48
	RBF	4.44		-3.18
	IDW	2.89		-4.73

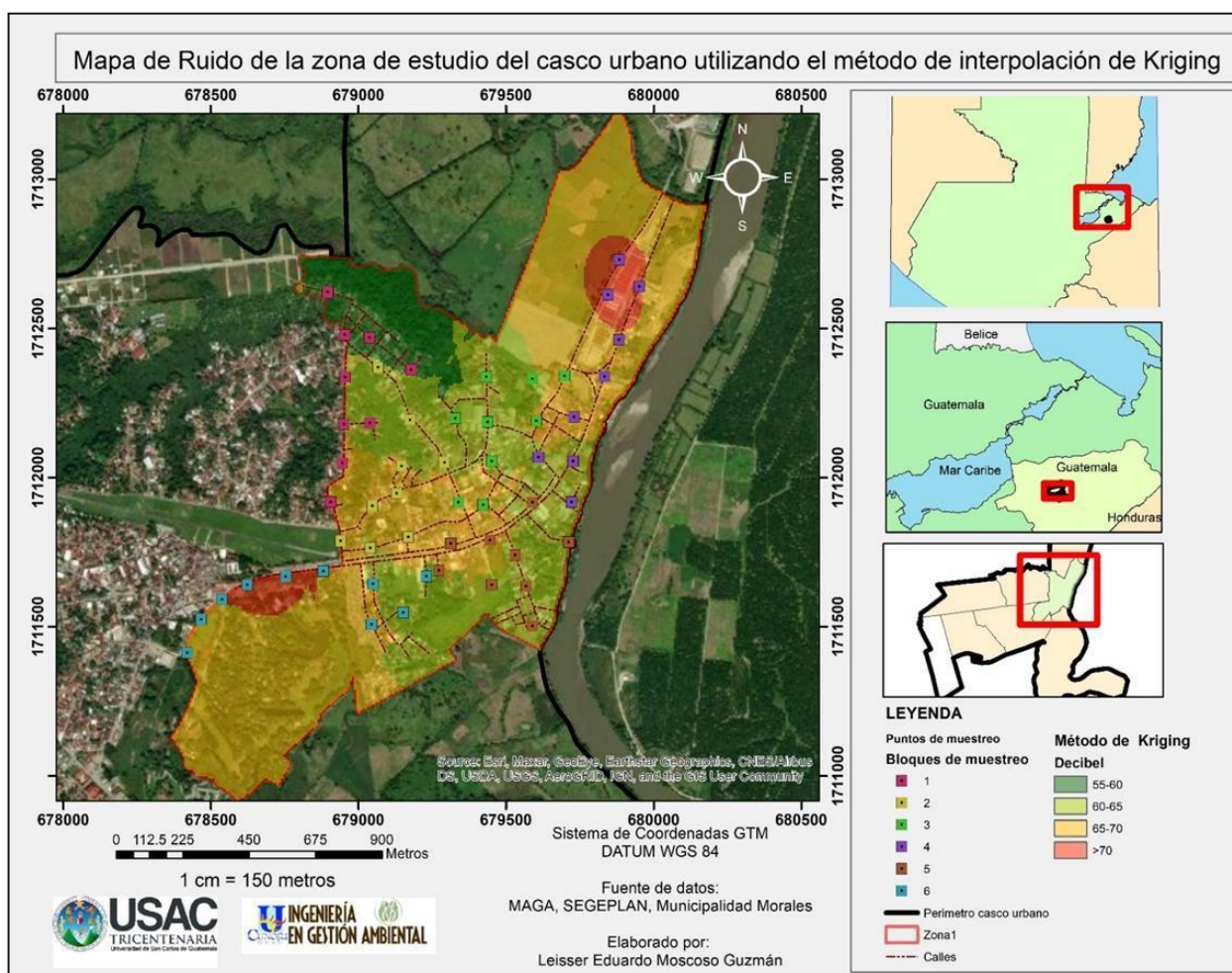
Fuente: Elaboración propia, 2020.

9.1.4 Mapa de ruido según método de interpolación kriging

El mapa de ruido utilizando el método de interpolación de kriging presenta niveles sonoros con una predominancia entre los 66 dB y 70 dB distribuido en zonas comerciales y zonas de exteriores habitables. Los mayores niveles de ruido se concentran en los puntos del bloque 4 y del bloque 6, presentando ruido sobre los 70 dB.

Mediante el uso del método de interpolación de kriging los niveles de ruido más bajos en el área de estudio se presentan en los puntos del bloque 1 donde la mayoría se encuentra en los rangos de 55 dB – 60 dB y 61 dB – 65 dB. Se observa a mayor detalle los niveles de ruido en el área de estudio (ver figura 19).

Figura 19. Mapa de ruido del área de estudio utilizando método de interpolación kriging



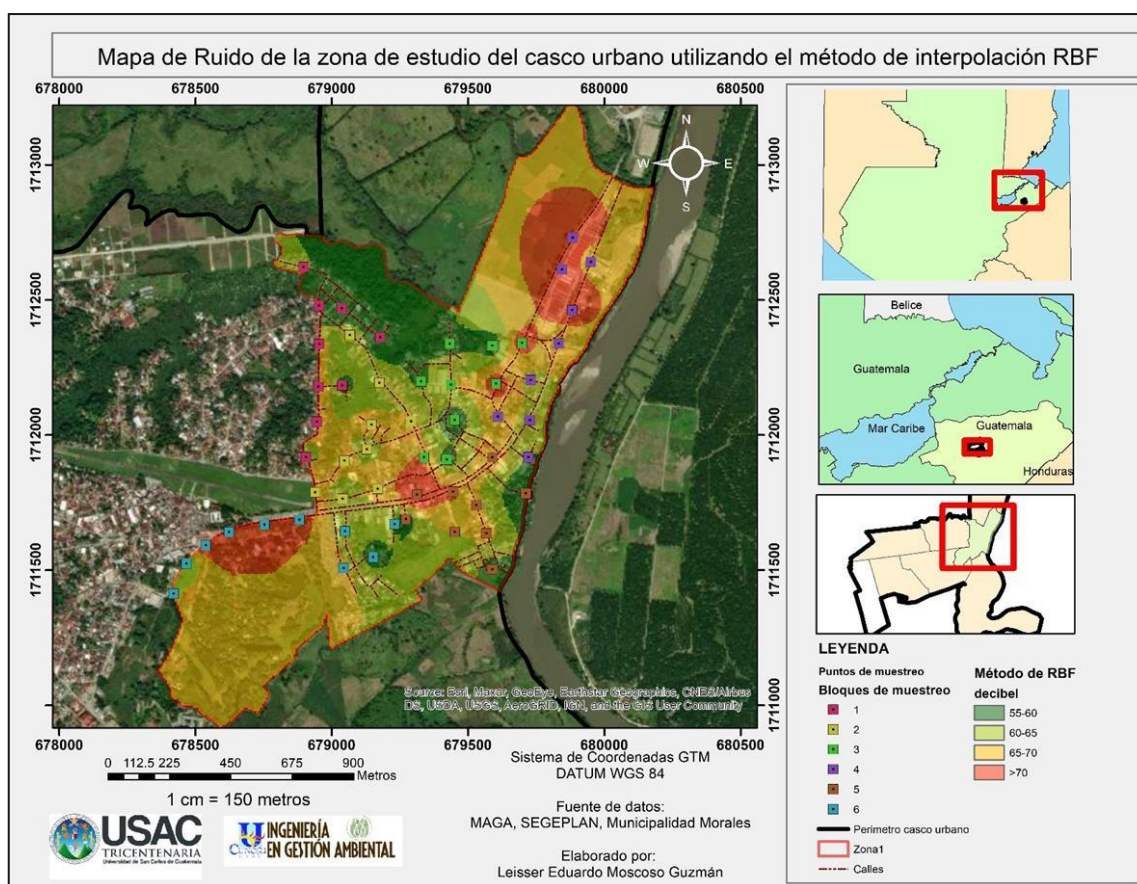
Fuente: Elaboración propia, 2020.

9.1.5 Mapa de ruido según funciones de base radial (RBF)

El mapa de ruido utilizando el método de interpolación RBF presenta áreas con niveles sonoros más heterogéneos. En comparación al método de kriging, los resultados obtenidos con RBF existen más áreas donde los niveles sonoros son muy altos, superando los 70 dB tanto en zonas comerciales como de exterior habitable.

Mediante el uso de la interpolación de RBF los niveles ruido más bajos en el área de estudio se presentan en los puntos del bloque 1, bloque 3 y en menor cantidad en el bloque 5, donde varía entre de 55 dB – 60 dB y 61 dB – 65 dB. Se observa a mayor detalle los niveles de ruido en el área de estudio (ver figura 20).

Figura 20. Mapa de ruido del área de estudio utilizando funciones de base radial (RBF)



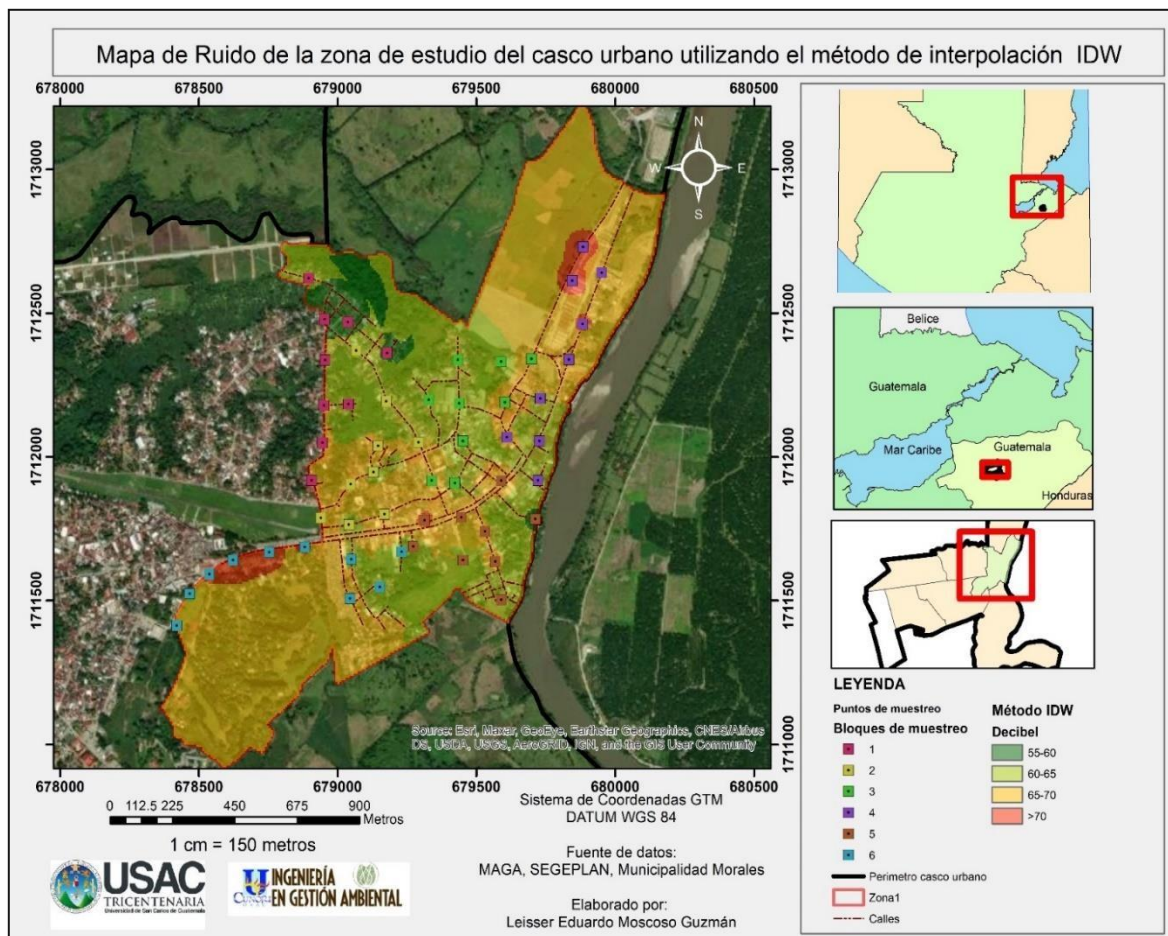
Fuente: Elaboración propia, 2020.

9.1.6 Mapa de ruido según ponderación por distancia inversa (IDW)

El mapa de ruido utilizando el método de interpolación IDW presenta áreas con niveles sonoros más homogéneos. En comparación al método de interpolación de kriging se obtuvieron con IDW igual cantidad de zonas donde los niveles sonoros son muy altos, pero de menor área, superando los 70 dB tanto en zonas comerciales como de exterior habitable.

Mediante el uso de la interpolación de IDW los niveles ruido más bajos en el área de estudio se presentan en los puntos del bloque 1 y en menor cantidad en el bloque 5, donde varía entre de 55 dB – 60 dB. Se observa a mayor detalle los niveles de ruido en el área de estudio (ver figura 21).

Figura 21. Mapa de ruido del área de estudio utilizando ponderación por distancia inversa (IDW)



Fuente: Elaboración propia, 2020.

9.2 Análisis de los niveles sonoros en el área de estudio

Como parte de la investigación se analizaron los niveles sonoros en la red de puntos de monitoreo distribuidos en la zona 1 del casco urbano del municipio de Morales, Izabal, los puntos de monitoreo comprenden un total de 55, ubicados en las principales calles y avenidas del área de estudio.

9.2.1 Niveles de ruido en las zonas comerciales y de exterior habitable

Como parte de la investigación se realizó una comparativa para determinar las áreas que actualmente poseen mayores niveles sonoros en la zona 1 del casco urbano del municipio de Morales, utilizando el método de interpolación de kriging, ya que es el método de interpolación que presenta mejores resultados para elaborar mapas de ruido urbano.

En la tabla 11 se observan los resultados obtenidos de los niveles sonoros utilizando el método de kriging, donde se determinó que en el área de estudio predominan los niveles sonoros entre 65 – 70 dB, abarcando el 54.87% del total del área de estudio, seguido un 32.05% donde predominan los niveles sonoros entre 60 – 65 dB; no obstante, el área con mayores niveles sonoros abarca el 4.90% superando los 70 dB.

Tabla 11. Niveles sonoros en las zonas según el tipo de uso del suelo en el área de estudio

Niveles sonoros (dB)	Zona comercial (Has)	Exterior habitable (Has)	Protección (Has)	Equipamiento (Has)	Total (Has)	Porcentaje (%)
55 - 60	6.14	0	7.52	0	13.66	8.19
60 - 65	28.16	16.01	6.21	3.11	53.49	32.05
65 - 70	26.55	39.09	22.55	3.36	91.55	54.86
>70	2.12	3.81	2.24	0	8.17	4.90
Total	62.97	58.91	38.52	6.47	166.87	100
Tipo de uso					Límite máximo	
Zona de exterior habitable					55 dB	
Zona comercial					70 dB	

Fuente: Elaboración propia, 2020.

a. Niveles sonoros en las zonas de comerciales

Para la presente investigación se han identificado dos áreas comerciales, donde los mayores niveles sonoros se encuentran en la zona comercial 2, principalmente en la calle principal del casco urbano de Morales, debido a tráfico vehicular; dicho fenómeno se concentra en un área que equivale al 3.37% del territorio que abarcan las zonas comerciales, sobrepasando el límite recomendado de 70 dB de la OMS.

Tabla 12. Niveles sonoros en las zonas comerciales del área de estudio

Áreas	Niveles sonoros (dB)				Total porcentaje (%)
	55 - 60	60 - 65	65 -70	>70	
Zona comercial 1	9.75	44.72	38.55	0.00	93.01
Zona comercial 2	0.00	0.00	3.62	3.37	6.99
Total	9.75	44.72	42.17	3.37	100.00

Fuente: Elaboración propia, 2020.

b. Niveles sonoros en las zonas de exterior habitable

En el casco urbano de Morales se definen dos zonas de exterior habitable, las cuales presentan niveles sonoros que sobrepasan el límite máximo recomendado por la OMS de 55 dB. En las zonas de exterior habitable los niveles sonoros se encuentran superior a los 60 dB; se estima que este fenómeno se presenta en el 100% de área que abarcan las zonas de exterior habitable, debido a la influencia de las actividades que se realizan en las zonas comerciales.

Tabla 13. Niveles sonoros en las zonas de exterior habitable del área de estudio

Áreas	Niveles sonoros (dB)				Total porcentaje (%)
	55 - 60	60 - 65	65 -70	>70	
Zona de exterior habitable 1	0.00	27.17	17.66	1.47	46.30
Zona de exterior habitable 2	0.00	0.00	48.70	5.00	53.70
Total	0.00	27.17	66.36	6.47	100.00

Fuente: Elaboración propia, 2020.

c. Niveles sonoros en zonas de equipamiento

Las áreas de equipamiento se encuentran en el interior de las zonas comerciales del área de estudio, por lo tanto, presentan niveles sonoros que se encuentran superiores a los 60 dB y por debajo del límite máximo de los 70 dB establecidos para las zonas comerciales por la OMS.

Tabla 14. Niveles sonoros en las zonas de equipamiento del área de estudio

Áreas	Niveles sonoros (dB)				Total porcentaje (%)
	55 - 60	60 - 65	65 -70	>70	
Equipamiento 1	0.00	0.14	31.29	0.00	31.43
Equipamiento 2	0.00	47.98	20.60	0.00	68.57
Total	0.00	48.11	51.89	0.00	100.00

Fuente: Elaboración propia, 2020.

d. Niveles sonoros en zonas de protección

Las zonas de protección se ubican en los límites del área de estudio, los niveles sonoros más altos se presentan en la zona de protección D, sobrepasando los 70 dB, debido a la cercanía con la zona comercial 2.

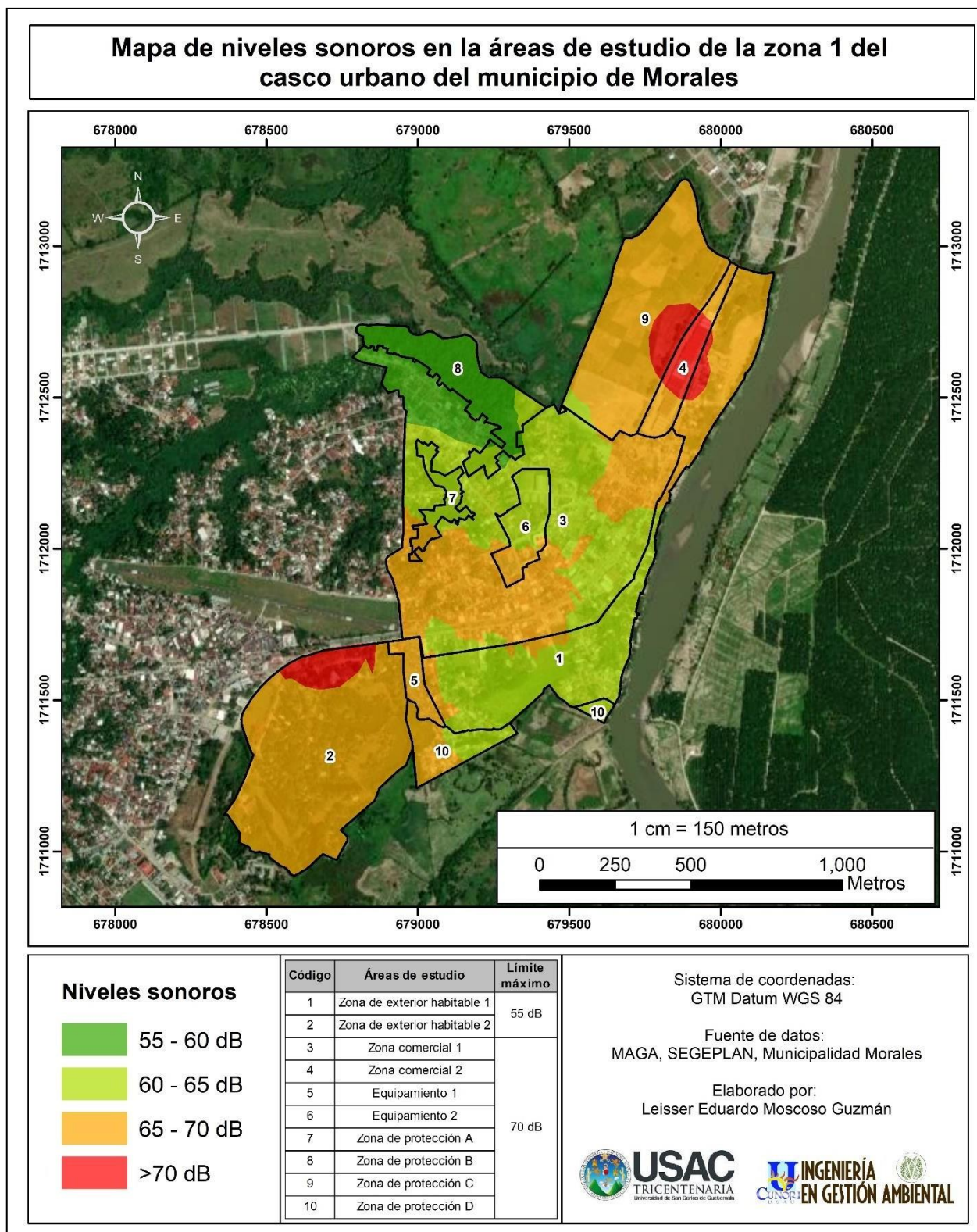
Tabla 15. Niveles sonoros en las zonas de equipamiento del área de estudio

Áreas	Niveles sonoros (dB)				Total porcentaje (%)
	55 - 60	60 - 65	65 -70	>70	
Zona de protección A	0.00	5.00	1.58	0.00	6.58
Zona de protección B	19.51	4.11	0.00	0.00	23.62
Zona de protección C	0.01	1.55	50.21	5.81	57.58
Zona de protección D	0.00	5.47	6.76	0.00	12.23
Total	19.52	16.12	58.55	5.81	100.00

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Se presenta de manera geoespacial los niveles sonoros en el área de estudio del casco urbano de Morales (ver figura 22).

Figura 22. Niveles de ruido según el tipo de uso de suelo en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2020.

9.2.2 Niveles sonoros promedio por punto de monitoreo

Para determinar los niveles sonoros promedio en el área de estudio ubicada en la zona 1 del casco urbano del municipio de Morales, Izabal, se estableció una red de monitoreo conformada por 55 puntos en zonas comerciales y zonas de exterior habitable. Los puntos de monitoreo fueron medidos de acuerdo a los horarios establecidos de 3 días por semana durante la mañana, medio día y tarde.

En la tabla 16, se observa que el nivel sonoro promedio en el área de estudio varía entre un mínimo de 47.82 dB y un máximo de 82.01 dB. El punto 25 presenta los niveles sonoros más bajos, el cual se ubica en una zona de exterior habitable, mientras que el punto 22 que registra los niveles sonoros más altos se encuentra en una zona de exterior habitable residencial.

Tabla 16. Nivel promedio de emisiones sonoras por punto en el área de estudio

Punto	Promedio Leq-dB(A)	Punto	Promedio Leq-dB(A)	Punto	Promedio Leq-dB(A)	Punto	Promedio Leq-dB(A)
1	71.84	15	56.33	29	60.80	43	57.28
2	74.52	16	63.91	30	70.93	44	62.08
3	65.10	17	68.66	31	56.29	45	58.57
4	67.75	18	65.45	32	71.00	46	66.78
5	59.35	19	69.53	33	59.64	47	75.29
6	49.30	20	58.87	34	76.02	48	62.34
7	66.98	21	68.76	35	66.25	49	62.47
8	56.77	22	82.01	36	65.64	50	57.00
9	57.14	23	71.28	37	68.80	51	57.41
10	77.25	24	65.98	38	66.61	52	53.90
11	76.58	25	47.82	39	53.10	53	75.12
12	74.50	26	73.85	40	69.42	54	60.81
13	61.48	27	63.12	41	62.41	55	55.94
14	57.20	28	67.99	42	74.65		

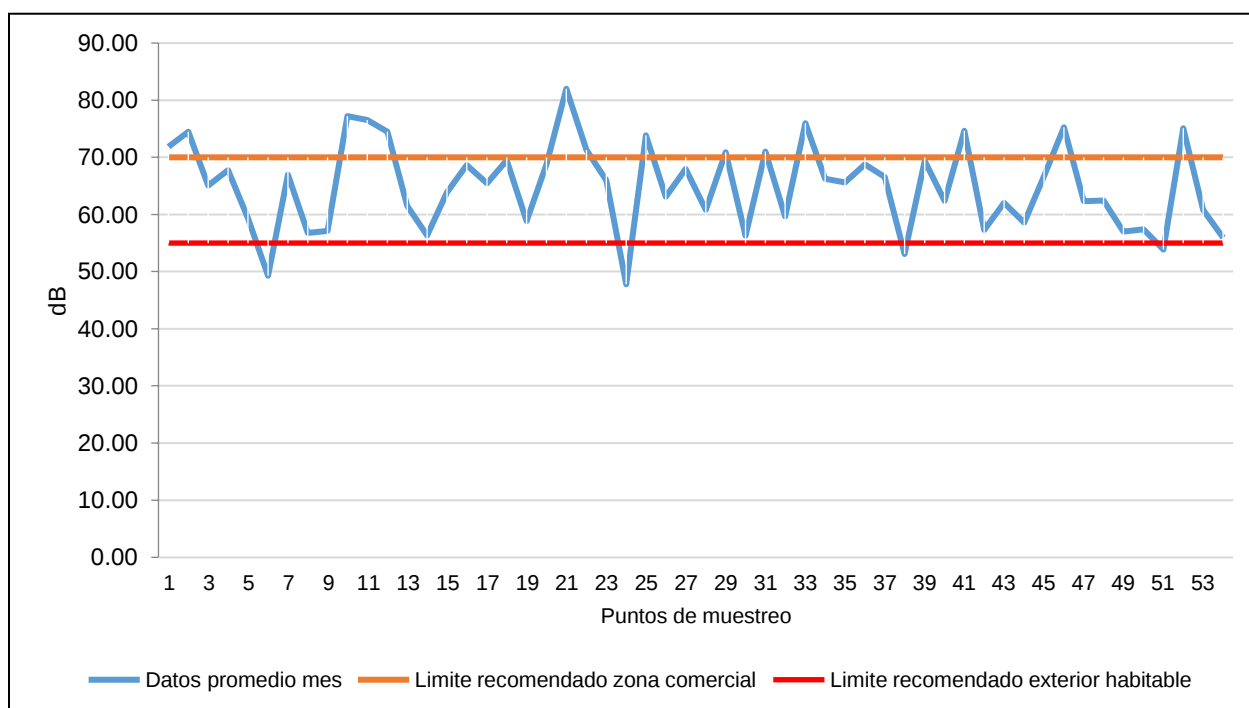
Fuente: Elaboración propia, 2020.

La mayor parte de los puntos de muestreo que sobrepasan el límite de 70 dB permitidos en una zona comercial, se encuentran en la avenida principal de la ciudad, la cual cabe destacar que son zonas mixtas, pero donde predomina la zona comercial. Otro factor que incrementa los niveles del ruido en la zona comercial proviene de los vehículos que transitan en las calles principales en los horarios de la mañana y tarde.

En zonas residenciales la mayor parte de los puntos sobrepasan el límite recomendado de 55 dB, esto se debe principalmente a que son de uso mixto, donde existe una significativa presencia de comercio y negocios locales, los cuales en horarios diurnos contribuyen a incrementar los niveles sonoros que afectan a la población que se ubica en dichas zonas residenciales.

Se observan los niveles sonoros promedio de los puntos monitoreados en el área de estudio, así mismo se presentan los límites recomendados para zonas de exterior habitables y zonas comerciales (ver figura 23).

Figura 23. Niveles sonoros promedio de los puntos monitoreados en el área de estudio en el año 2020



Fuente: Elaboración propia, 2020.

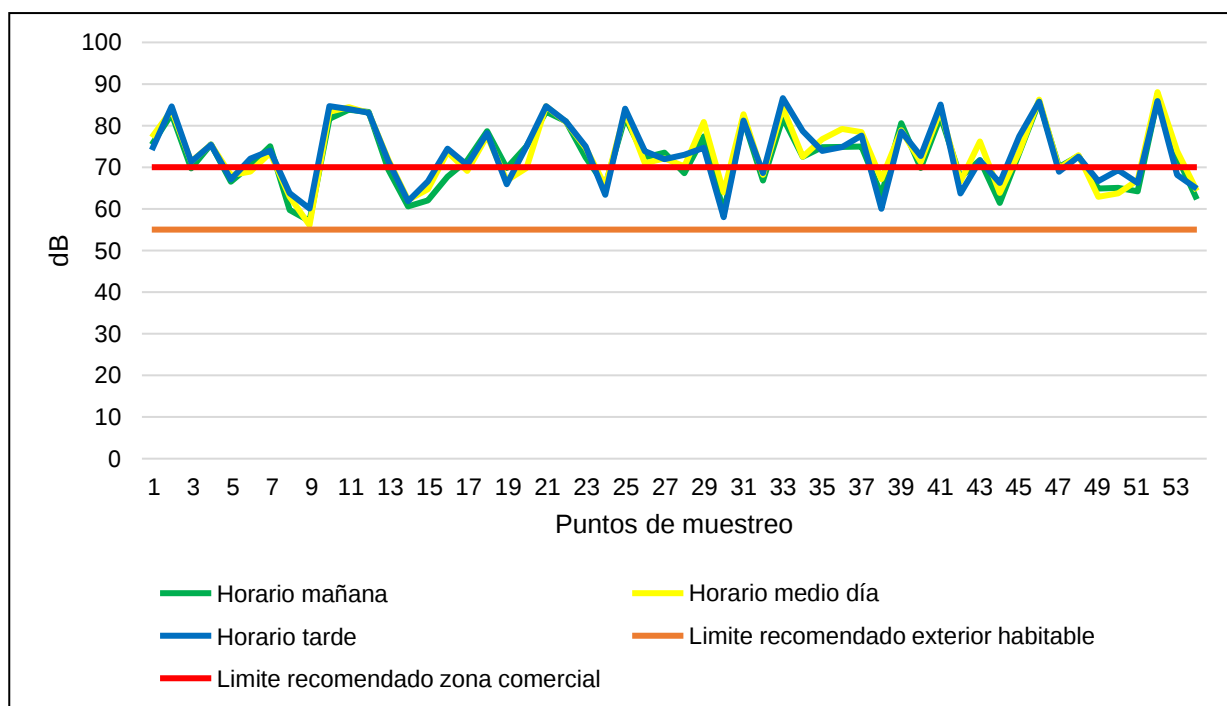
9.2.3 Niveles sonoros promedio por horario

Como parte de la investigación se determinaron los niveles sonoros promedio de acuerdo al horario establecido, el cual comprende los días lunes, miércoles, jueves y sábado en los horarios de la mañana (7:00 – 9:00), medio día (12:00 – 14:00) y tarde (17:00 – 19:00), en un periodo establecido de seis semanas para el monitoreo.

Mediante el análisis de los niveles sonoros promedio por horario se determinó que el horario establecido para el medio día, el cual comprende de las 12:00 – 14:00 horas, presenta los mayores niveles sonoros, donde factores como el tránsito vehicular, actividades de promoción con equipos de sonido y el sonido generado por bocinas de negocios comerciales influyen directamente en el comportamiento del nivel sonoro en el área de estudio.

Se presentan los niveles sonoros promedio de acuerdo a los horarios establecidos, y su respectiva comparación con los límites máximos permisibles de niveles sonoros para zonas comerciales y zonas de exterior habitable de la OMS (ver figura 24).

Figura 24. Niveles sonoros promedio por horario en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2020.

9.3 Lineamientos generales para la gestión del ruido en área de estudio

De acuerdo a los resultados obtenidos en los niveles de ruido en el área de estudio, las zonas de exterior habitable poseen mayores niveles de ruido en comparación a las zonas comerciales, superando el límite 55 dB recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para zonas de exterior habitable.

En el área de estudio las zonas comerciales impactan de manera directa los niveles de ruido en las zonas de exterior habitable, debido a la cercanía entre ambas; además, se debe considerar que el centro comercial se encuentra en expansión, y el incremento del tráfico vehicular con transporte normal y de carga pesada incrementan los niveles de ruido, por lo tanto, es de vital importancia formular lineamientos generales que contribuyan a gestionar la problemática del ruido en la zona 1 del casco urbano del municipio de Morales, con la finalidad de contribuir a mejorar la calidad de vida de los habitantes.

Los lineamientos generales se encuentran orientados a las zonas comerciales y zonas de exterior habitable, ya que presentaron mayores niveles de ruido en el área de estudio. Para su formulación se contemplaron los aspectos de innovación tecnológica, gestión del territorio y la modificación de los hábitos de uso de los equipos y aparatos generadores de sonido, dichos lineamientos son los siguientes:

- Medidas para gestionar la problemática de los niveles sonoros en las zonas comerciales.
- Medidas para gestionar la problemática de los niveles sonoros en zonas de exterior habitable.
- Mejoramiento de los hábitos de uso de los equipos generadores de ruido.
- Implementación de plan para monitoreo de niveles sonoros.

Se presentan a mayor detalle los lineamientos generales y las estrategias para la gestión del ruido en la zona 1 del casco urbano del municipio de Morales (ver tabla 17).

Tabla 17. Lineamientos generales para la gestión del ruido en el área de estudio

Lineamiento general	Objetivo	Estrategias	Responsable
Medidas para gestionar la problemática de los niveles sonoros en las zonas comerciales	Contribuir en la mejora del manejo territorial en materia de gestión del ruido para mejorar las condiciones de calidad de vida de la población en base a los límites de ruido para zonas comerciales.	- Definir un mecanismo para la emisión y otorgamiento de renovación de licencias para el uso de equipos de sonidos, megáfonos y otros aparatos generadores de ruido en las diferentes actividades económicas locales. - Establecer un límite de niveles sonoros para las zonas comerciales en el casco urbano de Morales, se recomienda no mayor a 70 dB en horario diurno en el interior del establecimiento. - Los vehículos promotores no podrán exceder un máximo de 70 dB en zonas comerciales. - Realizar inspecciones de niveles sonoros en lugares como centros comerciales, bares, discotecas, y otros negocios con equipos generadores de sonido cuenten con la autorización y respectiva licencia vigente.	- Dirección Municipal de Planificación (DMP). - Unidad de Gestión Ambiental Municipal (UGAM). - Juez de asuntos municipales. - Centro Universitario de Izabal (CUNIZAB).

Continuación tabla 17

Lineamiento general	Objetivo	Estrategias	Responsable
Medidas para gestionar la problemática de los niveles sonoros en zonas de exterior habitable	Contribuir en la mejora del manejo territorial en materia de gestión del ruido para mejorar las condiciones de calidad de vida de la población en base a los límites de ruido para zonas de exterior habitable.	• Establecer un límite de niveles sonoros en zonas de exterior habitable, para horario diurno 65 dB, horario nocturno 40 dB. • En zonas de exterior habitable los vehículos promotores no deberán sobrepasar los 65 dB. • Delimitar zonas de restricción acústica de forma temporal o permanente en zonas residenciales, centros educativos, o que la municipalidad considere necesarios. • Definir horarios para el uso de equipos generadores que sobrepasen el límite establecido de sonido en las zonas de exterior habitable. • Realizar inspecciones en negocios como bares, discotecas, iglesias, comedores y otros negocios con equipos generadores de sonido cuenten con la autorización y su respectiva licencia vigente.	• Dirección Municipal de Planificación (DMP). • Unidad de Gestión Ambiental Municipal (UGAM). • Juez de asuntos municipales. • Centro Universitario de Izabal (CUNIZAB).

Continuación tabla 17

Lineamiento general	Objetivo	Estrategias	Responsable
Mejoramiento de los hábitos de uso de los equipos generadores de ruido	Sensibilizar a la población del casco urbano del municipio de Morales mediante capacitaciones y medios informativos sobre los efectos en la salud del uso inadecuado de equipos generadores de ruido para reducir los niveles de ruido y mejorar la calidad de vida de la población	• Establecer programas de difusión que promuevan actividades dirigidas a concientizar, sensibilizar y educar a la población en general sobre el uso de equipos de sonido, instrumentos y otros aparatos generadores de sonido. • Establecer un programa de educación ambiental orientada a la sensibilización sobre la problemática de la contaminación por ruido en los centros educativos. • Elaborar un programa de sensibilización hacia la población empresas y/o negocios locales sobre la problemática de la contaminación por ruido. • Capacitar al personal de la municipalidad de Morales, el cual será el encargado de realizar los monitoreos de los niveles sonoros en el casco urbano del municipio.	• Dirección Municipal de Planificación (DMP). • Unidad de Gestión Ambiental Municipal (UGAM). • Centro Universitario de Izabal (CUNIZAB). • Practicantes, epeistas de Ingeniería en Gestión Ambiental Local, Pedagogía, Trabajo social, Comunicación, entre otros.

Continuación tabla 17

Lineamiento general	Objetivo	Estrategias	Responsable
Implementación de plan para monitoreo de niveles sonoros	Identificar las posibles fuentes de ruido y llevar un control de la situación actual para implementar un plan de monitoreo de los niveles de ruido en el casco urbano de municipio de Morales.	• Adquisición de equipos para la medición sonora como lo son los sonómetros. • Identificación de las posibles fuentes generadoras de ruido, centros comerciales, iglesias, discotecas, centros de recreación, restaurantes. • Diseño e implementación de una red de monitoreo de ruido. • Implementación de un sistema de seguimiento y calidad de los datos obtenidos en los monitoreos mensuales. • Socialización de la información generada de los monitoreos de niveles de ruido a la población.	• Dirección Municipal de Planificación (DMP) • Unidad de Gestión Ambiental Municipal (UGAM). • Centro Universitario de Izabal (CUNIZAB).

10. CONCLUSIONES

- a. Durante el periodo de las seis semanas comprendidas entre julio y agosto del 2020 en el área de estudio ubicada en la zona 1 del casco urbano del municipio de Morales, Izabal, se determinó que el promedio general de los niveles sonoros es de 69.3 dB, valor que sobrepasa los valores 55 dB para zona residencial, pero se mantienen debajo de los 70 dB para zona comercial que son recomendados por la OMS, indicando contaminación sonora en los puntos monitoreados que presentan estos niveles sonoros.
- b. Se determinó que las áreas donde se registraron los niveles sonoros promedio más elevados están ubicadas en la avenida principal del casco urbano, específicamente en la entrada del casco urbano y en las zonas comerciales.
- c. De acuerdo con los resultados obtenidos en los niveles sonoros promedio por horario, se determinó que el día con mayor promedio de niveles sonoros corresponde al día sábado con un promedio de 85.6 dB, en el tercer horario medido que comprende de las 17:00 a 19:00 Hrs, debido al tránsito vehicular y actividades comerciales.
- d. Con base en los parámetros establecidos para la matriz de priorización de métodos de interpolación, se identificaron que los métodos de Kriging, funciones de base radial (RBF), y el de distancia inversa ponderada (IDW), obtuvieron una mayor ponderación, ya que poseen características con la mejor funcionalidad en entornos urbanos para realizar mapas de ruido.
- e. De acuerdo a los indicadores estadísticos y los mapas construidos, el método de interpolación de Kriging presenta los mejores resultados, demostrando una coherencia entre el comportamiento del ruido en los valores pronosticados y los existentes en el área de estudio, donde se puede apreciar que los niveles más altos de ruido se encuentran en las calles principales y en las zonas comerciales.

- f. Dado que los niveles de ruido en el casco urbano del municipio de Morales exceden los límites máximos permisibles de 70 dB para las zonas comerciales y 45 dB en las zonas de exterior habitable, es necesario que las autoridades locales implementen mecanismos de control y medidas de mitigación de los niveles de ruido, con la finalidad de que a la población se le brinde un entorno acústicamente sano.
- g. Los datos de la investigación presentada constituyen una línea base que los gobiernos locales o universidades pueden utilizar para desarrollar herramientas de gestión ambiental relacionadas al monitoreo del ruido.

11. RECOMENDACIONES

- a. Implementar un plan de monitoreo mensual de los niveles sonoros, generando un historial de información que contribuya a facilitar la toma de decisiones para mitigar la problemática de los niveles sonoros en el casco urbano del municipio de Morales.
- b. Generar investigaciones que complementen la metodología adecuada para determinar la densidad adecuada y establecer los puntos de monitoreo y realizar la elaboración de diagnósticos o mapas de ruido.
- c. Realizar un diagnóstico general sobre los niveles de ruido en establecimientos sensibles como lo son hospitales, centros de salud y escuelas, para implementar medidas que contribuyan a mejorar el entorno de dichos establecimientos.
- d. Capacitar a las autoridades locales, comunidad universitaria y población en general sobre la importancia de un ambiente con niveles sonoros aceptables, la implementación de medidas para la reducción del ruido y su beneficio en la salud humana.
- e. Generar un manual a nivel municipal para la realización de monitoreo de ruido a nivel urbano y rural.

12. REFERENCIAS

- Aistec. (c2022). *Formas de ruido que pueden llevar a la elaboración de un mapa de ruido*. Edición del autor. <https://aistec.com/blog/fuentes-mapa-de-ruido/>
- Brüel, V. y Kjær, V. (2000). *Ruido ambiental*. Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S www.bksv.com/doc/br1630.pdf
- Camposeco Espina, L. I. (2003). *Medición, evaluación y control del ruido de una industria de maquilado de tubería de acero* [Tesis de licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala]. Biblioteca Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1066_IN.pdf
- Cando Moreno, C. V. y Utreras Venegas, E.P. (2007). *Estudio, planificación y diseño de sonorización del Instituto Geográfico Militar* [Tesis de Licenciatura, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/206/1/CD-0614.pdf> 
- Chilés, J. P. y Delfiner, P. (1999). *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc. https://www.academia.edu/18259329/0_1999_Geostatistics_Modeling_Spatial_Uncertainty
- Consejo Municipal de Desarrollo del Municipio de Morales. (2010). *Plan de desarrollo municipal de Morales, Izabal*. Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. https://portal.segeplan.gob.gt/segeplan/wp-content/uploads/2022/08/PDM_1804-1.pdf
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2007). *Mapa de ruido, municipio de Girardot Cundinamarca*. Edición del autor. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b32a013443e2.pdf>

Echeverri Londoño, C. A. y González Fernández, A. E. (2011). Protocolo para medir la emisión de ruido generado por fuentes fijas. *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18), 51-60.
<http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v10n18/v10n18a06.pdf>

Environmental Systems Research Institute. (c2016). Introducción sobre los métodos de interpolación. ArcGis Pro.
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/extensions/geostatistical-analyst/an-introduction-to-interpolation-methods.htm>

Environmental Systems Research Institute. (s.f.). *Cómo funciona Kriging*. ArcGis Pro. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>

Environmental Systems Research Institute. (s.f.). *Descripción general del conjunto de herramientas Interpolación ráster*. ArcGis Pro. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/an-overview-of-the-raster-interpolation-toolset.htm>



España Villela, S. I. (2015). *Monitoreo de los niveles sonoros en la zona 1 de la ciudad de Chiquimula, municipio de Chiquimula durante marzo a junio de 2015* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Oriente]. Pagina Digital Oficial del Centro Universitario de Oriente.
http://cunori.edu.gt/descargas/Monitoreo_de_los_niveles_sonoros_en_la_zona_1_de_la_Ciudad_de_Chiquimula_municipio_de_Chiquimula_durante_marzo_a_junio_de_2015.pdf

Felipe Sexto, L. (2010). ¿Cómo elegir un sonómetro? Biblioteca Virtual Centro de Estudio Innovación y Mantenimiento. <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/sonometr.htm>

Gómez Espinoza, J. P. y Parra Cárdenas, E. F. (2012). Generación de un modelo de predicción de ruido aplicando técnicas geoestadísticas en las parroquias de San Rafael y Sangolquí del Cantón Rumiñahui [Tesis de licenciatura, Universidad de las Fuerzas Armadas, Escuela Politécnica del Ejercito]. Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5596/1/T-ESPE-033688.pdf>

González, J., Guerra, F. y Gómez, H. (2007). Conceptos básicos de geoestadística en geografía y ciencia de la tierra: manejo y aplicación. *Revista Geoenseñanza*, 12(1), 81-90. <https://www.redalyc.org/pdf/360/36014577008.pdf>

Grijalba, J. (24-25 de enero de 2018). La influencia del paisaje sonoro en la calidad del entorno urbano; un enfoque hacia la experiencia sonora de la ciudad latinoamericana [conferencia]. VI Congreso Internacional Ciudades Creativas, Madrid, España. https://www.researchgate.net/publication/322978990_LA_INFLUENCIA_DE_L_PAISAJE_SONORO_EN_LA_CALIDAD_DEL_ENTORNO_URBANO_UN_ENFOQUE_HACIA_LA_EXPERIENCIA_SONORA_DE_LA_CIUADAD_LATINOAMERICANA

Henao, R. G. (2021). *Introducción a la geoestadística: teoría y aplicación*. Universidad Nacional de Colombia https://geoinnova.org/wp-content/uploads/2021/08/LIBRO_-DE-_GEOESTADISTICA-R-Giraldo.pdf



Hewitt, P. G. (2004). Vibraciones y ondas: fundamentos de vibraciones y ondas. *En Prácticas de física conceptual* (9a edición, pp.69-70). Pearson Educación. http://fisica2.fica.unsl.edu.ar/Fisica_TUMI/Practicas%20de%20fisica%20conceptual%20Hewitt.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (c2011). *Diseño de la muestra en proyectos de encuesta*. INEGI. https://www.snieg.mx/documentacionportal/normatividad/vigente/doctos_gen_basica/muestra_encuesta.pdf

Instituto Nacional de Estadística. (2018). *Cuadro A1, población total por sexo, grupos quinquenales y área*. Edición del autor. <https://www.censopoblacion.gt/explorador>

Jorba Casellas, O. (2005). *Simulación de los campos de viento de la Península Ibérica y el área geográfica de Catalunya con alta resolución espacial para distintas situaciones meteorológicas típicas* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. Repositorio Tesis Doctorals en Xarxa <https://www.tdx.cat/handle/10803/6836#page=22>



López Méndez, J. V. (2009). *Análisis del evento meteorológico del 2007 relacionado con la inundación de Tabasco* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y cambio climática de la Universidad Nacional Autónoma de México. http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/images/archivos_portal/tesis/TesisM_Valentin_Lopez.pdf

Miyara, F. (s.f.). *Niveles sonoros*. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm>

- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J. D., Pardo, A. y Rendón, J. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. *Revista Ingenierías USBMed*, 3(1), 62-68. <https://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/265/179>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2016). *La contaminación sonora en Lima y Callao*. N. Loredó de Izcue y R. Villalba Garcés (eds.). Cyclis Pont Matt. https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=19087
- Organización Mundial de la Salud. (1999). *Guías para el ruido urbano*. Editado por B. Berglund; T. Lindvall; D. H Schwela. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. <http://ocw.unican.es/ciencias-de-la-salud/salud-publica-y-atencion-primaria-de-salud/otros-recursos-1/lecturas/bloque-iii/Guias%20para%20el%20ruido%20urbano.pdf>
- Sánchez Pérez, L. A. (2011). Modelo computacional para genera un mapa de ruido ambiental utilizando mediciones en tiempo real [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio Digital Instituto Politécnico Nacional. <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/5677/1/Tesis%2012373.pdf>
- Santos Klee, A. L. (2003). *La sinfonía de los sordos: el problema del ruido en la ciudad de Guatemala* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Biblioteca Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/28/28_0333.pdf
- Saquisilí Guartamber, S. C. (2015). Evaluación de la contaminación acústica en la zona urbana de la ciudad de Azogues [Tesis de licenciatura, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21945/1/TESIS.pdf>



Tippens, P. E. (2009). Física 1 conceptos y aplicaciones. L. Solano Arévalo (Ed.). McGraw-Hills. <https://davidbuiles.files.wordpress.com/2010/01/fisica-1-conceptos-y-aplicaciones.pdf>

Yepes, D., Gómez, M., Sánchez, L. y Jaramillo, A. C. (2007). Metodología de elaboración de mapas acústicos como herramienta de gestión del ruido urbano – casco Medellín. *Revista Dyna*, 76(158), 29-40. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49612069004>



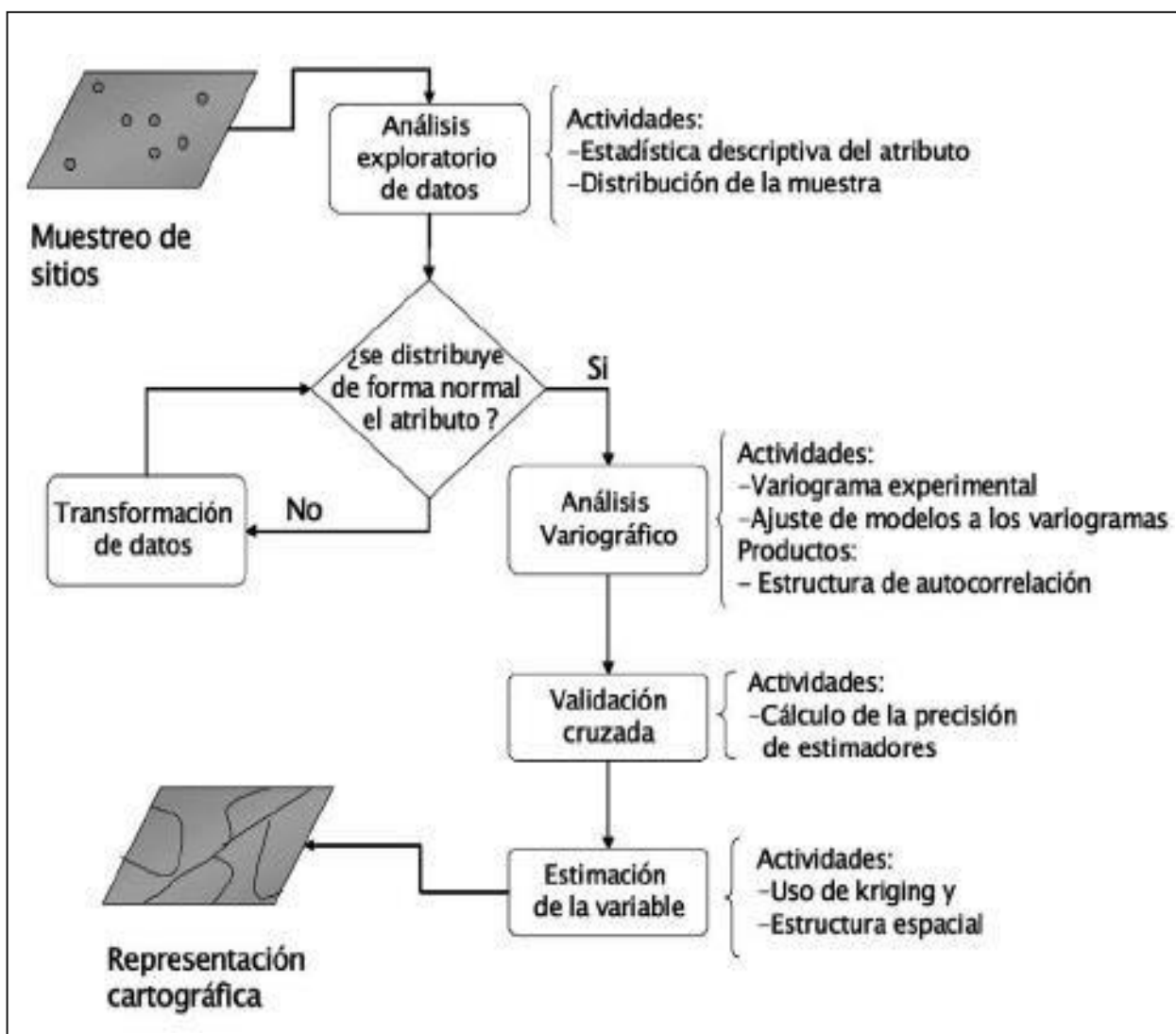
13. ANEXOS

Anexo 1. Tabla de parámetros de ruido de la Organización Mundial de la salud (OMS)

		Valores límite recomendados		
Recinto	Efectos en la salud	LAeq (dB)	Tiempo (horas)	LAmaz, fast (dB)
Exterior habitable	Malestar fuerte, día y anochece	55	16	-
	Malestar moderado, día y anochece	50	16	-
Interior de viviendas, Dormitorios	Interferencia en la comunicación verbal, día y anochece	35	16	45
	Perturbación del sueño, noche	30	8	45
Fuera de los dormitorios	Perturbación del sueño, ventana abierta (valores en el exterior)	45	8	60
Aulas de escolar y preescolar, interior	Interferencia en la comunicación, perturbación en la extracción de información, inteligibilidad del mensaje	35	Durante la clase	-
Dormitorios de preescolar, interior	Perturbación del sueño,	30	Horas de descanso	45
Escolar, terrenos de juego	Malestar (fuentes externas)	55	Durante el juego	-
Salas de hospitales, interior	Perturbación del sueño, noche	30	8	40
	Perturbación del sueño, día y anochece	30	16	-
Salas de tratamiento en hospitales, interior	Interferencia con descanso y restablecimiento	? ¹		
Zonas industriales, comerciales y de tráfico, interior y exterior	Daños al oído	70	24	110
Ceremonias festivas y actividades recreativas	Daños al oído (asistentes habituales: <5 veces/año)	100	4	110
Altavoces, interior y exterior	Daños al oído	85	1	110
Música a través de cascos y auriculares	Daños al oído (valores en campo libre)	85 ⁴	1	110
Sonidos impulsivos de juguetes, fuegos artificiales y armas de fuego	Daños al oído (adultos)	-	-	140 [?] ²
	Daños al oído (niños)	-	-	140 [?] ²
Exteriores en parques y áreas protegidas	Perturbación de la tranquilidad	? ³		
Notas ?¹: Tan débil como se pueda. ?²: Presión sonora pico (no Lmax, fast), medida a 100 mm del oído. ?³: Las zonas tranquilas exteriores deben preservarse y minimizar en ellas la razón de ruido perturbador a sonido natural de fondo. ?⁴: Bajo los cascos, adaptada a campo libre.				

Fuente: Elaborado con base en Organización Mundial de la Salud, 1999.

Anexo 2. Etapas para realizar la estimación de la distribución espacial de un atributo, con geostatística



Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Ficha de registro de observaciones

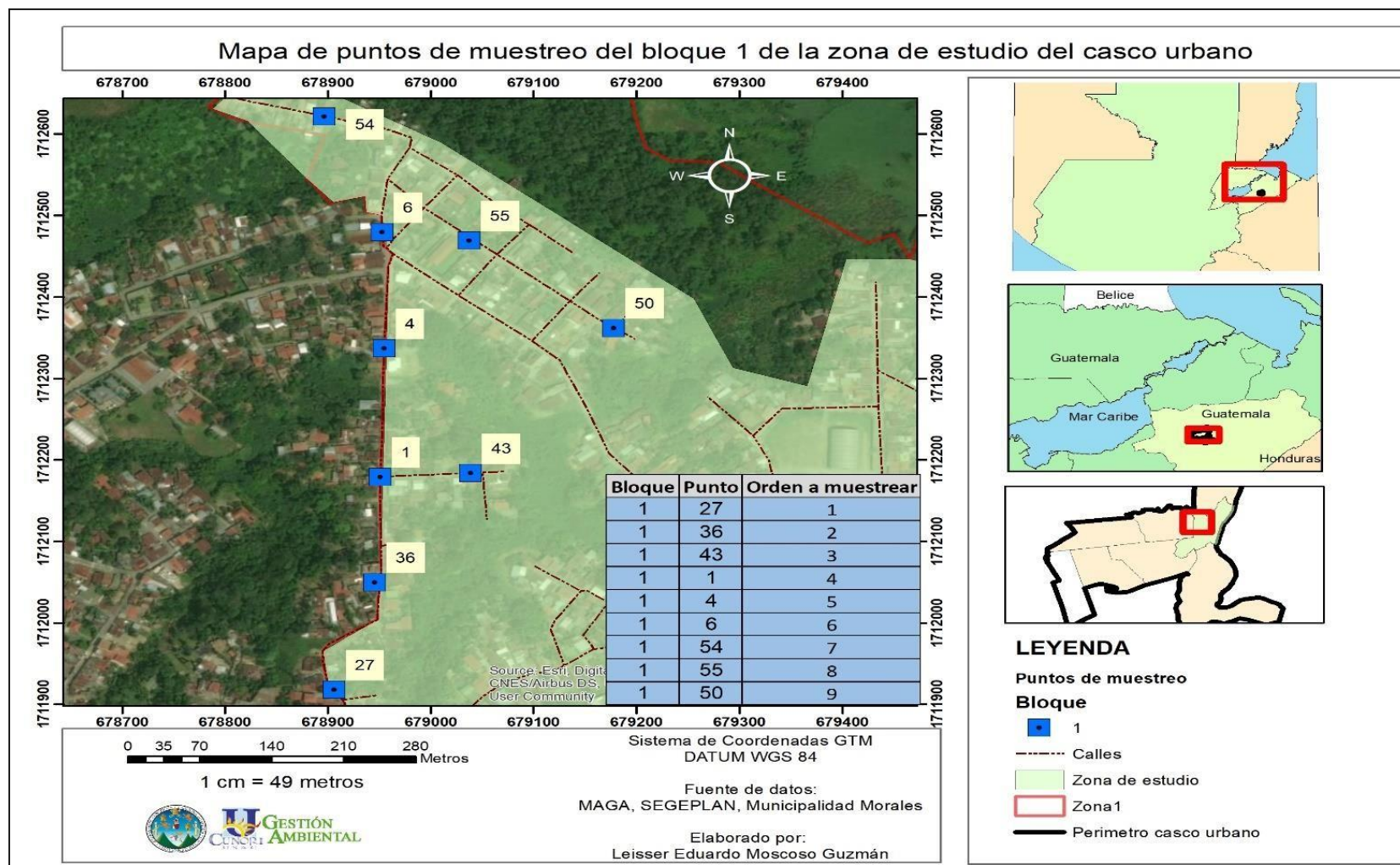
Dia 2					
No. Punto	Coordenadas GTM		Horario 1	Horario 2	Horario 3
	X	Y	Leq	Leq	Leq

Dia 3					
No. Punto	Coordenadas GTM		Horario 1	Horario 2	Horario 3
	X	Y	Leq	Leq	Leq

Dia 4					
No. Punto	Coordenadas GTM		Horario 1	Horario 2	Horario 3
	X	Y	Leq	Leq	Leq

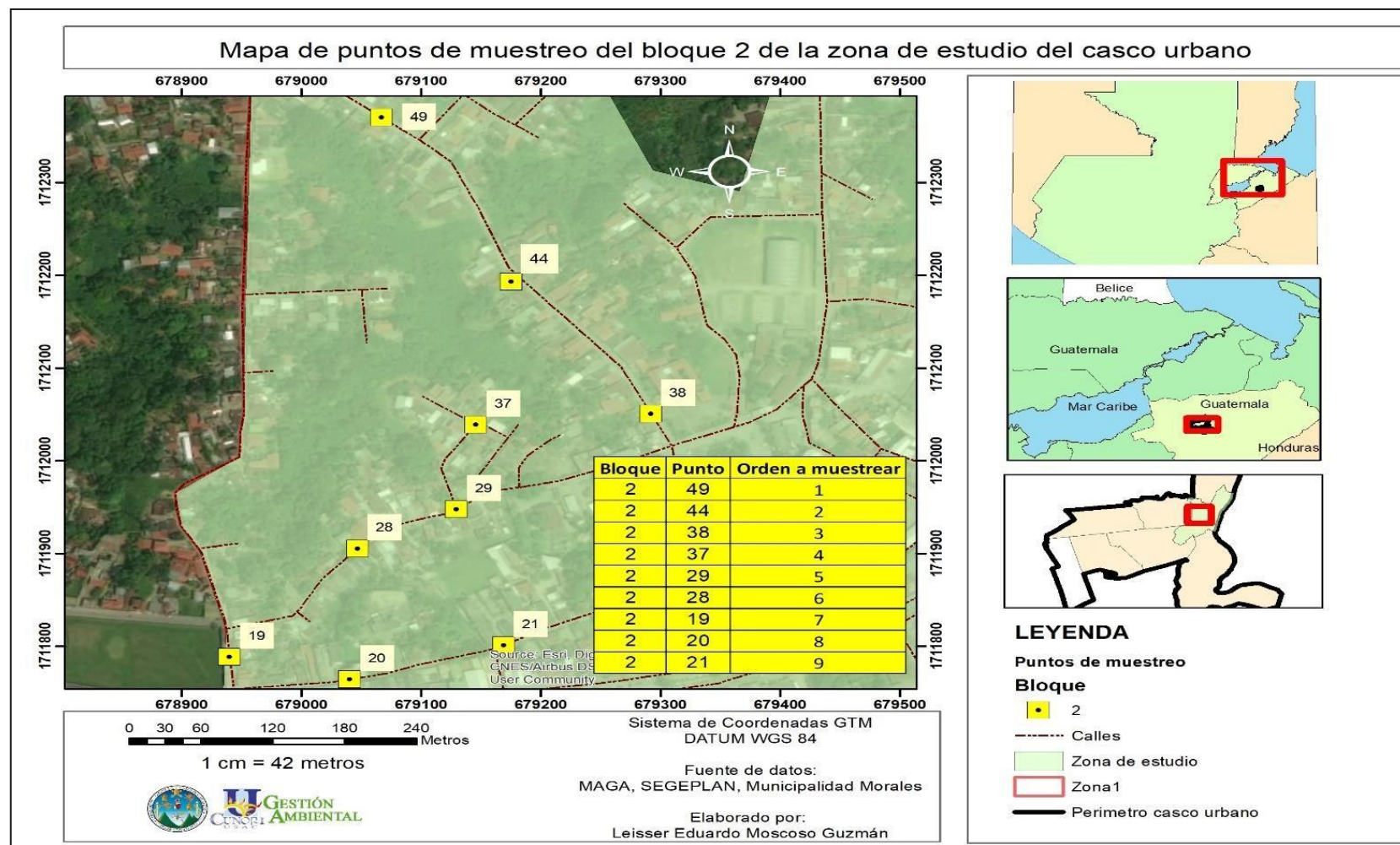
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Apéndice 2. Distribución espacial de cada punto de muestreo del bloque 1



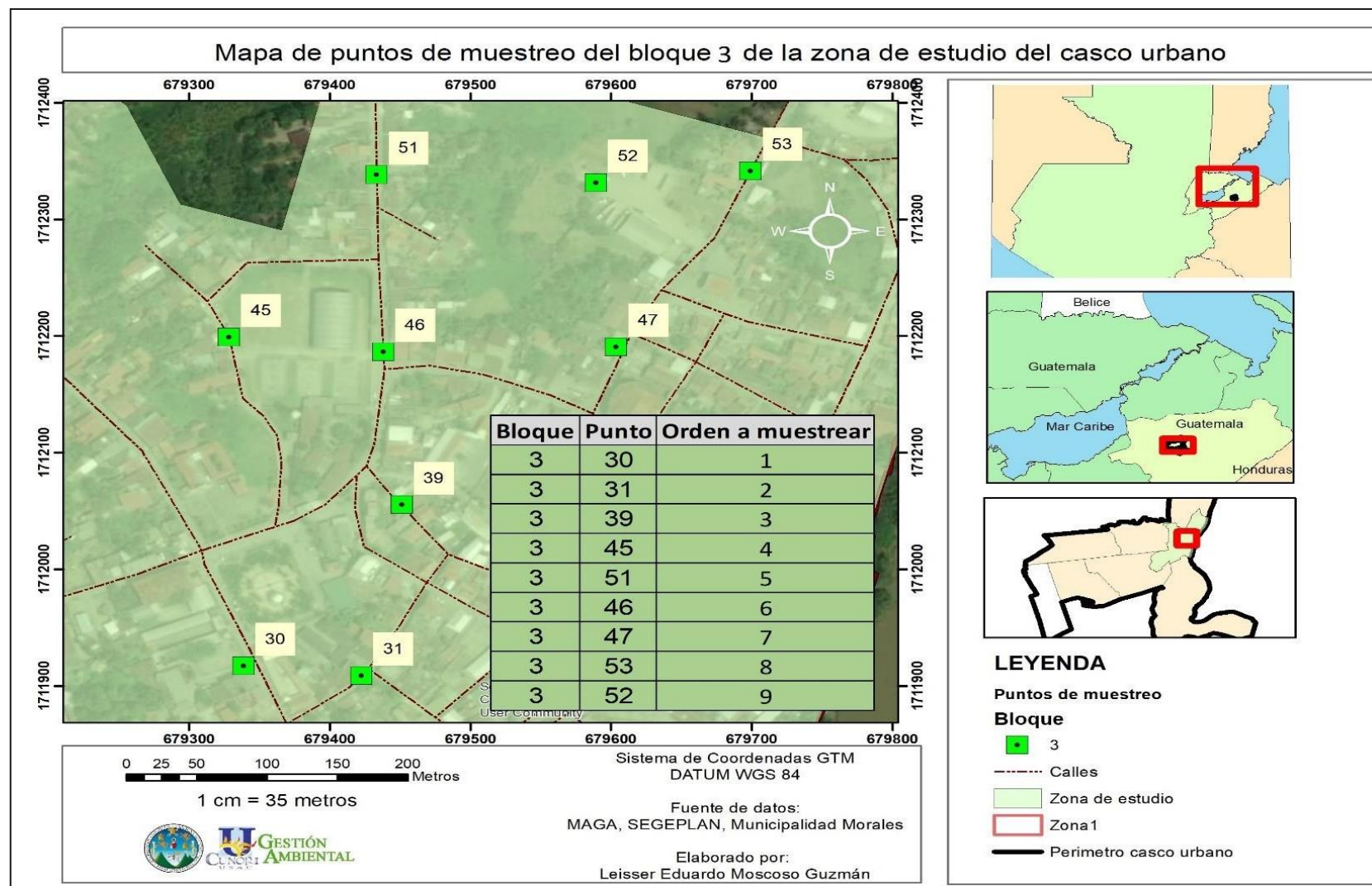
Fuente: Elaboración propia, 2020.

. Apéndice 3. Distribución espacial de cada punto de muestreo del bloque 2



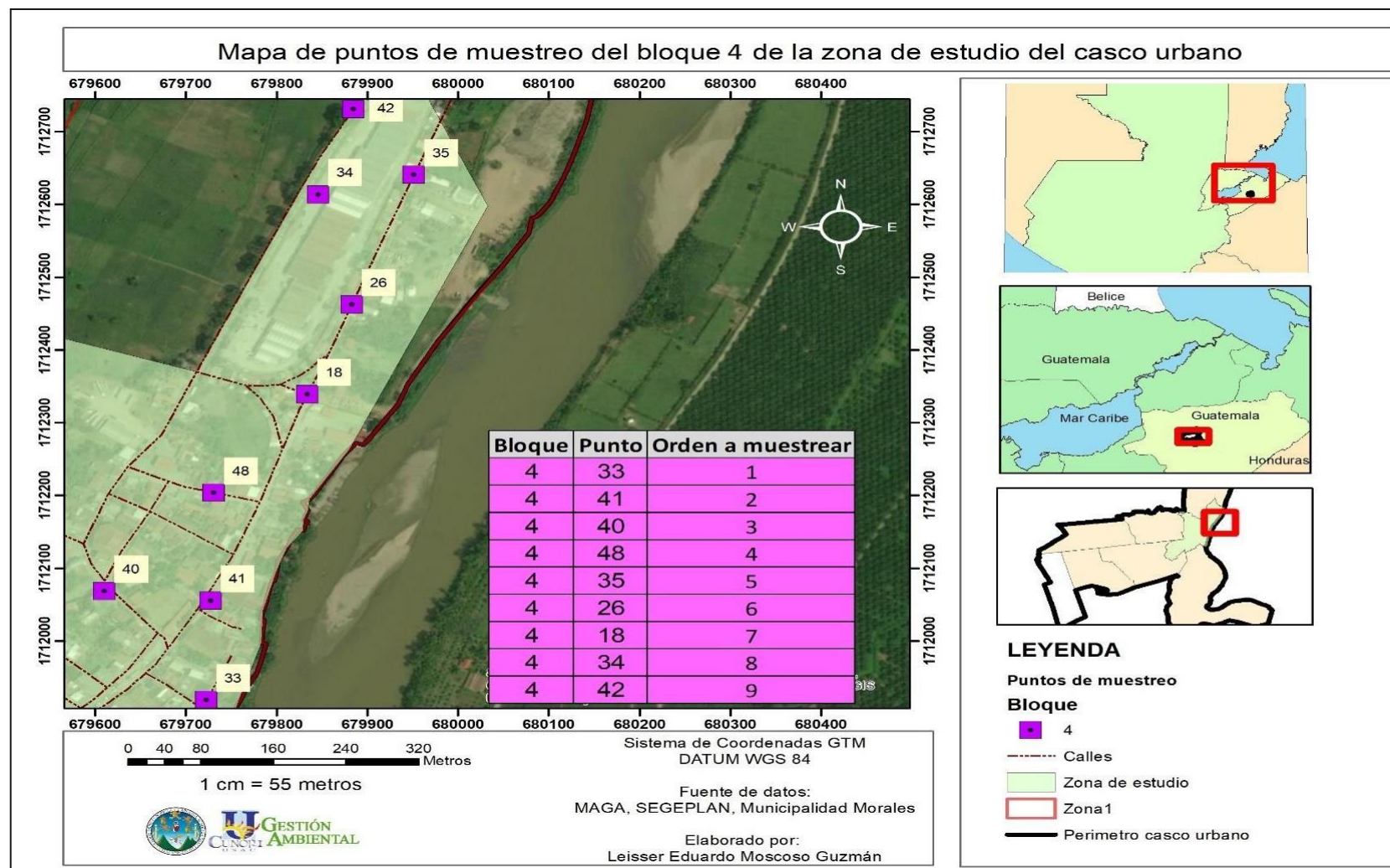
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Apéndice 4. Distribución espacial de cada punto de muestreo según del bloque 3



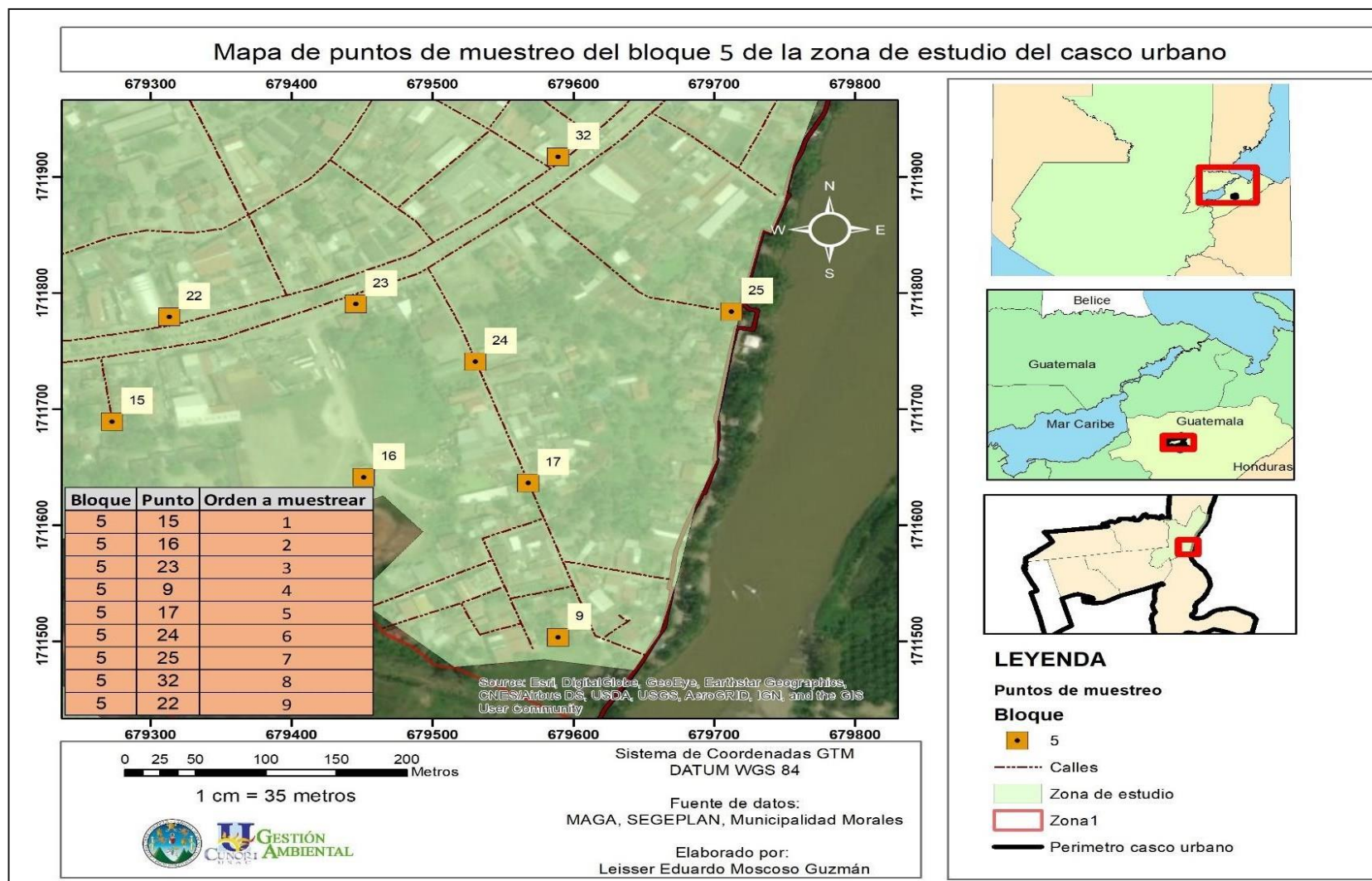
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Apéndice 5. Distribución espacial de cada punto de muestreo según del bloque 4



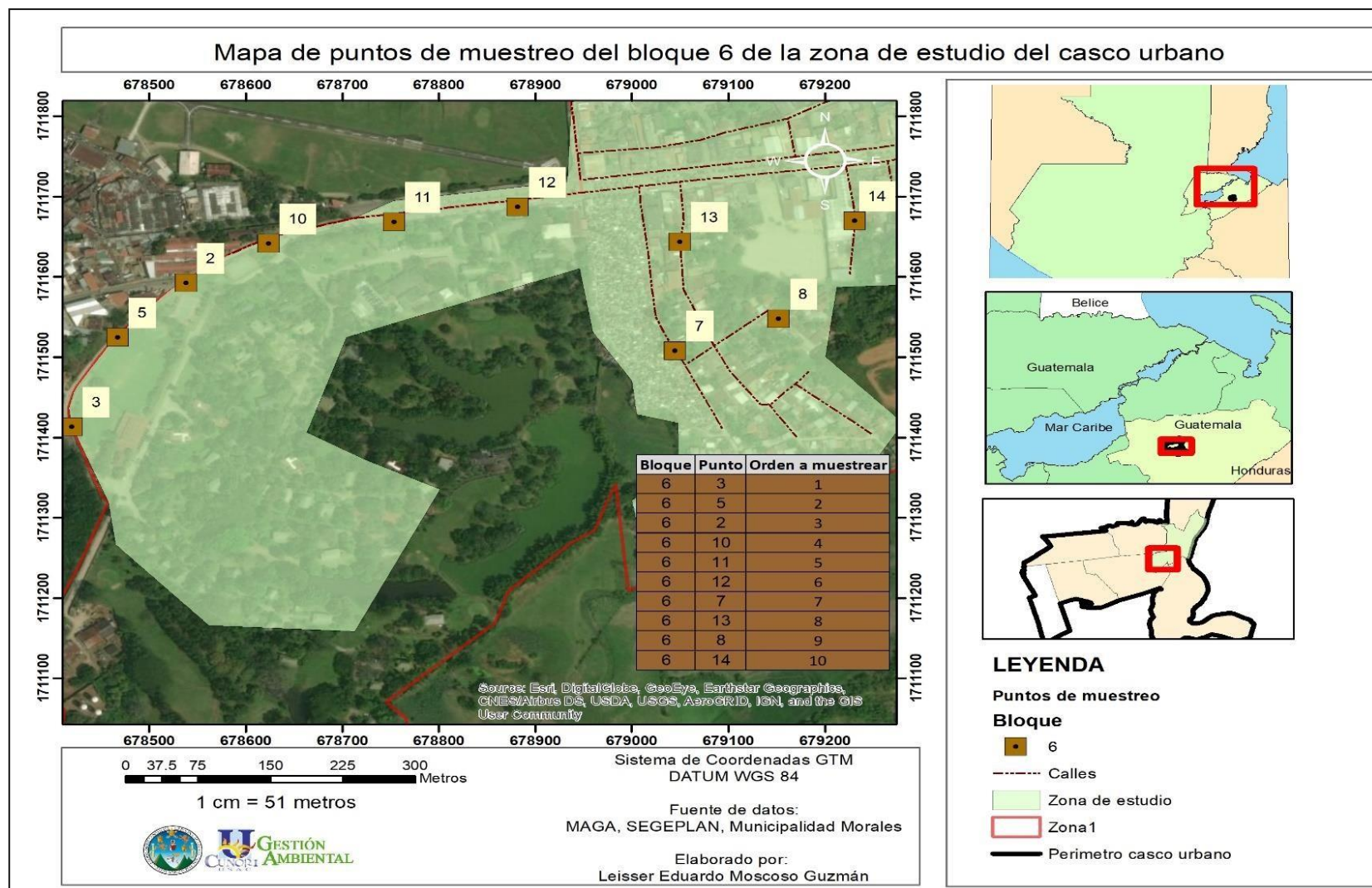
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Apéndice 6. Distribución espacial de cada punto de muestreo según el bloque 5



Fuente: Elaboración propia, 2020.

Apéndice 7. Distribución espacial de cada punto de muestreo según del bloque 6



Fuente: Elaboración propia, 2020.

Apéndice 8. Horario de monitoreo de los puntos a muestrear durante 6 semanas

Semana	Semana 1											
Día	Lunes			Jueves			Viernes			Domingo		
Horario	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00
Puntos de muestreo	27	3	15	30	3	49	15	27	33	30	3	15
	36	5	16	31	5	44	16	36	41	31	5	16
	43	2	23	39	2	38	23	43	40	39	2	23
	1	10	9	45	10	37	9	1	48	45	10	9
	4	11	17	51	11	29	17	4	35	51	11	17
	6	12	24	46	12	28	24	6	26	46	12	24
	54	7	25	47	7	19	25	54	18	47	7	25
	55	13	32	53	13	20	32	55	34	53	13	32
	50	8	22	52	8	21	22	50	42	52	8	22
		14			14						14	
Semana	Semana 2											
Día	Lunes			Jueves			Viernes			Domingo		
Horario	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00
Puntos de muestreo	49	27	3	33	30	3	49	15	27	33	30	3
	44	36	5	41	31	5	44	16	36	41	31	5
	38	43	2	40	39	2	38	23	43	40	39	2
	37	1	10	48	45	10	37	9	1	48	45	10
	29	4	11	35	51	11	29	17	4	35	51	11
	28	6	12	26	46	12	28	24	6	26	46	12
	19	54	7	18	47	7	19	25	54	18	47	7
	20	55	13	34	53	13	20	32	55	34	53	13
	21	50	8	42	52	8	21	22	50	42	52	8
			14			14						14
Semana	Semana 3											
Día	Lunes			Jueves			Viernes			Domingo		
Horario	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00
Puntos de muestreo	30	49	27	27	33	30	3	49	15	27	33	30
	31	44	36	36	41	31	5	44	16	36	41	31
	39	38	43	43	40	39	2	38	23	43	40	39
	45	37	1	1	48	45	10	37	9	1	48	45
	51	29	4	4	35	51	11	29	17	4	35	51
	46	28	6	6	26	46	12	28	24	6	26	46
	47	19	54	54	18	47	7	19	25	54	18	47
	53	20	55	55	34	53	13	20	32	55	34	53
	52	21	50	50	42	52	8	21	22	50	42	52
							14					

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Continuación apéndice 8.

Semana	Semana 4											
Día	Lunes			Jueves			Viernes			Domingo		
Horario	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00
Puntos de muestreo	33	30	49	15	27	33	30	3	49	49	27	33
	41	31	44	16	36	41	31	5	44	44	36	41
	40	39	38	23	43	40	39	2	38	38	43	40
	48	45	37	9	1	48	45	10	37	37	1	48
	35	51	29	17	4	35	51	11	29	29	4	35
	26	46	28	24	6	26	46	12	28	28	6	26
	18	47	19	25	54	18	47	7	19	19	54	18
	34	53	20	32	55	34	53	13	20	20	55	34
	42	52	21	22	50	42	52	8	21	21	50	42
								14				
Semana	Semana 5											
Día	Lunes			Jueves			Viernes			Domingo		
Horario	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00
Puntos de muestreo	15	33	30	49	15	27	33	30	3	15	49	27
	16	41	31	44	16	36	41	31	5	16	44	36
	23	40	39	38	23	43	40	39	2	23	38	43
	9	48	45	37	9	1	48	45	10	9	37	1
	17	35	51	29	17	4	35	51	11	17	29	4
	24	26	46	28	24	6	26	46	12	24	28	6
	25	18	47	19	25	54	18	47	7	25	19	54
	32	34	53	20	32	55	34	53	13	32	20	55
	22	42	52	21	22	50	42	52	8	22	21	50
									14			
Semana	Semana 6											
Día	Lunes			Jueves			Viernes			Domingo		
Horario	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00	6:00-8:00	12:00-2:00	5:00-7:00
Puntos de muestreo	3	15	33	3	49	15	27	33	30	3	15	49
	5	16	41	5	44	16	36	41	31	5	16	44
	2	23	40	2	38	23	43	40	39	2	23	38
	10	9	48	10	37	9	1	48	45	10	9	37
	11	17	35	11	29	17	4	35	51	11	17	29
	12	24	26	12	28	24	6	26	46	12	24	28
	7	25	18	7	19	25	54	18	47	7	25	19
	13	32	34	13	20	32	55	34	53	13	32	20
	8	22	42	8	21	22	50	42	52	8	22	21
	14			14						14		

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Apéndice 9. Resumen de los niveles sonoros registrados en el área de estudio

X_GTM	Y_GTM	pto1.1	leq1.1	pto1.2	leq1.2	pto1.3	leq1.3
678951	1712179	1	66.1	1	75.4	1	74.9
678538	1711592	2	82.9	2	83.1	2	84.2
678420	1711413	3	69.4	3	69.6	3	72.0
678955	1712337	4	74.7	4	72.3	4	76.2
678467	1711525	5	69.3	5	65.4	5	68.2
678953	1712480	6	64.9	6	72.2	6	71.8
679045	1711508	7	74.7	7	77.0	7	67.9
679152	1711548	8	55.2	8	60.9	8	69.2
679589	1711504	9	56.1	9	53.6	9	56.1
678623	1711642	10	79.9	10	84.2	10	87.6
678753	1711669	11	85.1	11	81.8	11	81.3
678882	1711687	12	83.8	12	84.5	12	80.5
679050	1711644	13	70.1	13	64.4	13	70.8
679273	1711689	15	59.8	15	57.3	15	59.8
679451	1711642	16	61.2	16	58.7	16	61.2
679568	1711636	17	54.2	17	71.0	17	73.5
679834	1712339	18	67.2	18	63.7	18	70.3
678940	1711789	19	76.7	19	79.5	19	79.4
679040	1711764	20	73.1	20	76.8	20	68.9
679169	1711801	21	78.8	21	74.2	21	74.8
679313	1711780	22	82.2	22	79.7	22	82.2
679446	1711791	23	83.8	23	81.3	23	83.8
679531	1711741	24	68.5	24	66.0	24	68.5
679712	1711784	25	76.0	25	73.5	25	75.6
679883	1712462	26	86.6	26	83.1	26	89.7
678906	1711918	27	71.5	27	74.2	27	68.7
679047	1711905	28	69.3	28	78.0	28	74.8
679129	1711948	29	65.6	29	70.6	29	72.1
679339	1711918	30	72.6	30	80.3	30	75.4
679423	1711909	31	52.8	31	72.3	31	55.6
679589	1711918	32	79.9	32	77.4	32	79.9
679722	1711919	33	67.4	33	63.9	33	70.5
679846	1712614	34	80.6	34	77.1	34	83.7
679951	1712641	35	71.5	35	68.0	35	74.6
678946	1712050	36	68.0	36	77.7	36	77.6
679146	1712039	37	71.4	37	72.9	37	61.6
679292	1712051	38	72.4	38	73.4	38	78.5
679451	1712056	39	59.6	39	68.9	39	62.4
679610	1712069	40	81.0	40	77.5	40	84.1
679727	1712056	41	69.3	41	65.8	41	72.4
679885	1712731	42	85.1	42	81.6	42	88.2
679039	1712184	43	65.4	43	69.5	43	60.6
679175	1712194	44	66.3	44	75.3	44	72.1
679329	1712199	45	65.0	45	60.8	45	67.8
679438	1712187	46	79.3	46	70.5	46	82.1
679604	1712191	47	87.2	47	84.0	47	90.0
679731	1712204	48	66.2	48	62.7	48	69.3
679067	1712371	49	75.9	49	72.5	49	73.7
679178	1712362	50	70.0	50	67.0	50	63.8
679434	1712338	51	66.0	51	61.8	51	68.8
679589	1712332	52	63.9	52	60.5	52	66.7
679699	1712342	53	86.7	53	82.0	53	89.5
678897	1712622	54	70.5	54	77.5	54	75.3
679037	1712470	55	67.3	55	53.8	55	70.6
		horario mañana		horario medio día		horario tarde	
Lunes							

Continuación apéndice 9.

X_GTM	Y_GTM	pto2.1	leq2.1	pto2.2	leq2.2	pto2.3	leq2.3
678951	1712179	1	66.2	1	69.4	1	68.5
678538	1711592	2	87.3	2	84.0	2	83.8
678420	1711413	3	71.7	3	68.4	3	71.7
678955	1712337	4	70.3	4	76.4	4	72.6
678467	1711525	5	67.4	5	64.1	5	67.8
678953	1712480	6	71.2	6	71.5	6	73.5
679045	1711508	7	78.1	7	74.8	7	74.8
679152	1711548	8	61.7	8	58.4	8	66.8
679589	1711504	9	58.5	9	58.4	9	59.7
678623	1711642	10	87.3	10	84.0	10	84.0
678753	1711669	11	85.2	11	81.9	11	82.0
678882	1711687	12	85.4	12	82.1	12	81.3
679050	1711644	13	70.3	13	67.0	13	60.4
679273	1711689	15	54.1	15	54.0	15	55.3
679451	1711642	16	60.4	16	60.3	16	61.6
679568	1711636	17	71.7	17	71.6	17	72.9
679834	1712339	18	71.9	18	71.2	18	79.4
678940	1711789	19	73.8	19	69.9	19	71.4
679040	1711764	20	64.2	20	60.3	20	61.8
679169	1711801	21	77.4	21	73.5	21	75.0
679313	1711780	22	82.3	22	82.2	22	83.5
679446	1711791	23	80.7	23	80.6	23	81.9
679531	1711741	24	72.0	24	71.9	24	73.2
679712	1711784	25	54.7	25	54.6	25	55.9
679883	1712462	26	74.8	26	77.6	26	73.4
678906	1711918	27	80.0	27	71.5	27	82.3
679047	1711905	28	80.5	28	76.6	28	78.1
679129	1711948	29	80.4	29	76.5	29	78.0
679339	1711918	30	70.1	30	85.4	30	85.4
679423	1711909	31	50.3	31	67.7	31	67.7
679589	1711918	32	76.8	32	76.7	32	78.0
679722	1711919	33	63.6	33	69.6	33	68.5
679846	1712614	34	86.0	34	77.3	34	86.0
679951	1712641	35	70.3	35	60.1	35	76.3
678946	1712050	36	66.6	36	72.1	36	68.9
679146	1712039	37	81.2	37	77.3	37	78.8
679292	1712051	38	76.6	38	72.7	38	74.2
679451	1712056	39	57.1	39	63.1	39	63.1
679610	1712069	40	79.4	40	77.6	40	83.6
679727	1712056	41	69.1	41	76.9	41	72.8
679885	1712731	42	81.4	42	63.8	42	84.7
679039	1712184	43	61.0	43	54.8	43	63.3
679175	1712194	44	67.9	44	64.0	44	65.5
679329	1712199	45	62.5	45	65.6	45	65.6
679438	1712187	46	76.8	46	73.8	46	73.8
679604	1712191	47	84.7	47	85.3	47	85.3
679731	1712204	48	62.9	48	91.2	48	84.7
679067	1712371	49	72.1	49	68.2	49	69.7
679178	1712362	50	70.2	50	59.2	50	72.5
679434	1712338	51	67.6	51	63.8	51	63.8
679589	1712332	52	61.4	52	57.9	52	57.9
679699	1712342	53	84.6	53	65.9	53	65.7
678897	1712622	54	59.8	54	69.0	54	62.1
679037	1712470	55	58.1	55	60.3	55	60.4
		horario mañana		horario medio día		horario medio día	
Miercoles							

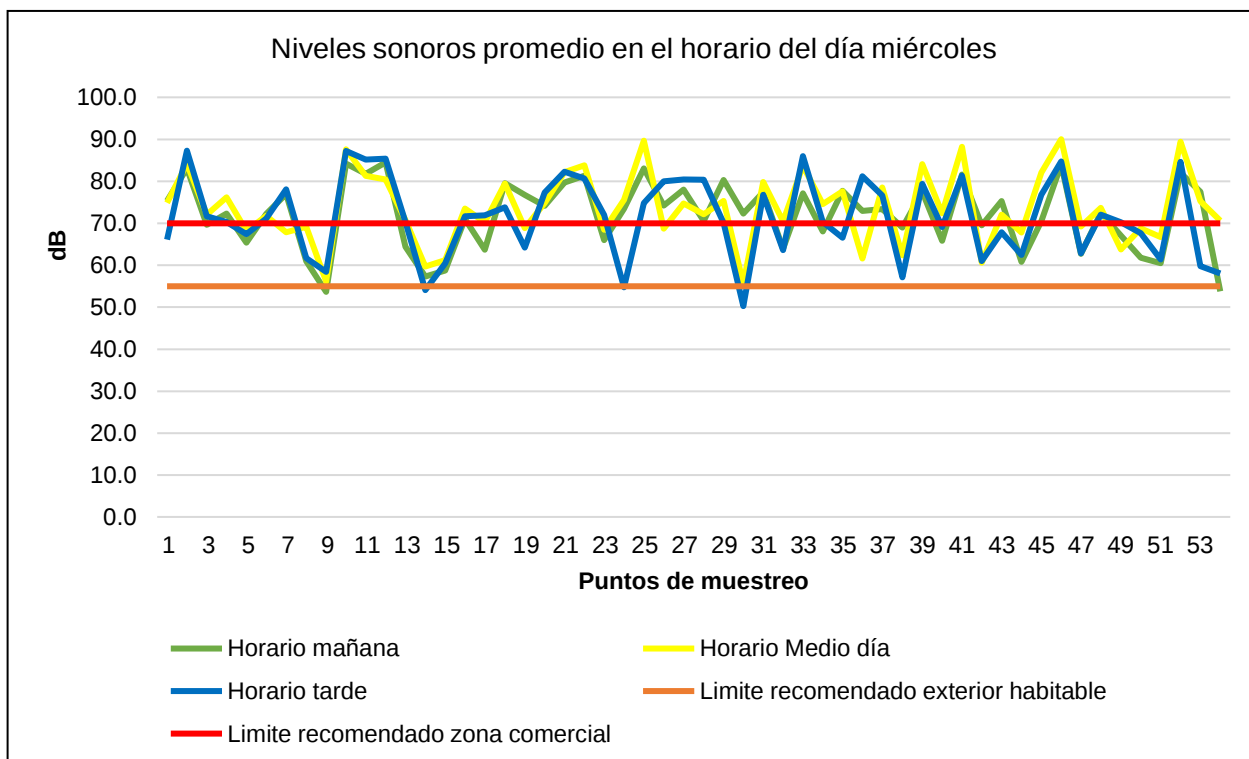
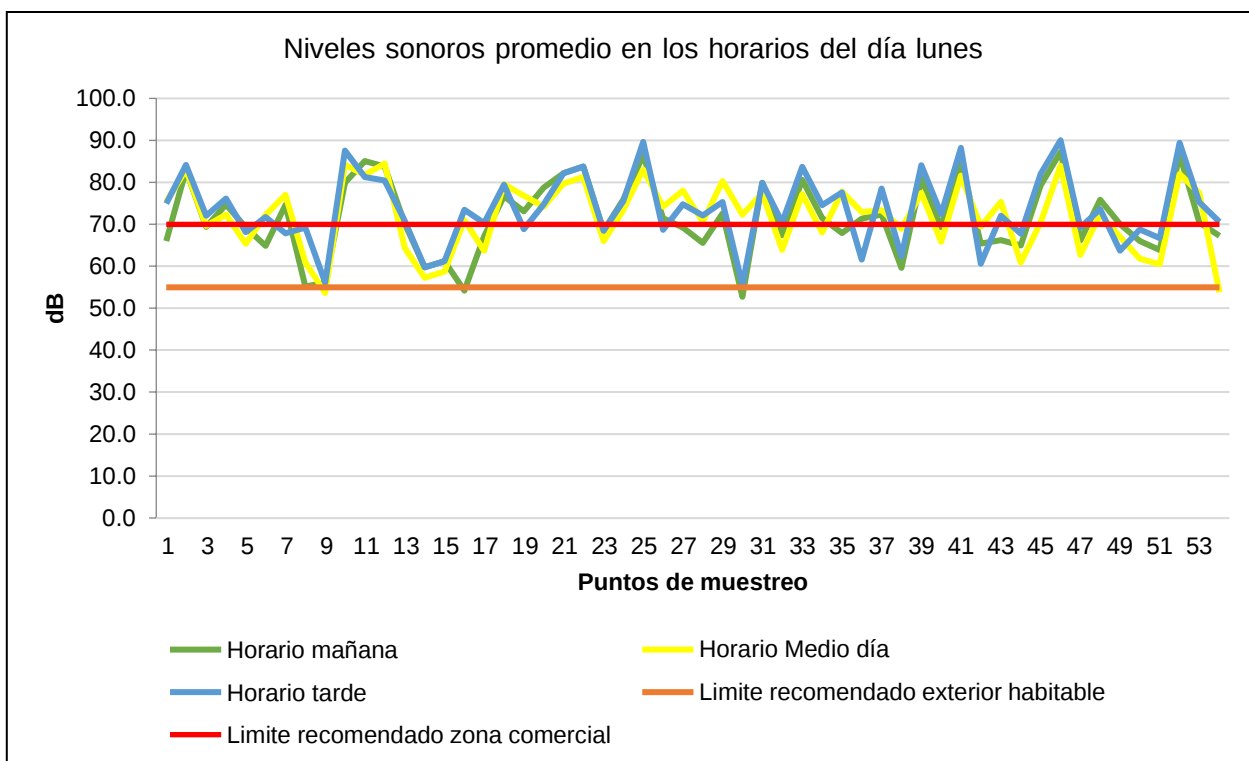
Continuación apéndice 9.

X_GTM	Y_GTM	pto3.1	leq 3.1	pto3.2	leq3.2	pto3.3	leq3.3
678951	1712179	1	80.4	1	79.84	1	73.4
678538	1711592	2	81.4	2	84.02	2	82.2
678420	1711413	3	67.9	3	72.09	3	68.7
678955	1712337	4	77.8	4	77.22	4	75.6
678467	1711525	5	63.7	5	67.70	5	64.5
678953	1712480	6	72.2	6	72.51	6	82.7
679045	1711508	7	75.3	7	73.23	7	76.1
679152	1711548	8	59.2	8	63.54	8	60.0
679589	1711504	9	60.7	9	57.84	9	67.1
678623	1711642	10	82.5	10	80.01	10	83.3
678753	1711669	11	80.1	11	88.11	11	80.9
678882	1711687	12	82.8	12	82.11	12	83.6
679050	1711644	13	62.7	13	80.60	13	63.5
679273	1711689	15	58.9	15	66.33	15	66.3
679451	1711642	16	58.2	16	70.06	16	73.9
679568	1711636	17	70.0	17	75.65	17	76.2
679834	1712339	18	75.5	18	80.35	18	75.2
678940	1711789	19	81.7	19	76.79	19	82.1
679040	1711764	20	67.6	20	61.91	20	68.0
679169	1711801	21	80.8	21	66.44	21	81.2
679313	1711780	22	82.5	22	89.00	22	84.5
679446	1711791	23	79.4	23	79.83	23	78.8
679531	1711741	24	72.3	24	82.65	24	76.0
679712	1711784	25	55.9	25	57.12	25	65.4
679883	1712462	26	83.9	26	74.58	26	83.6
678906	1711918	27	72.5	27	71.21	27	73.6
679047	1711905	28	71.5	28	75.16	28	71.9
679129	1711948	29	68.0	29	70.14	29	68.4
679339	1711918	30	69.9	30	87.11	30	70.6
679423	1711909	31	50.1	31	61.65	31	50.8
679589	1711918	32	81.0	32	87.43	32	80.1
679722	1711919	33	67.7	33	68.11	33	67.4
679846	1712614	34	83.9	34	86.03	34	83.6
679951	1712641	35	85.2	35	65.16	35	84.9
678946	1712050	36	75.6	36	77.80	36	74.4
679146	1712039	37	63.0	37	92.24	37	63.4
679292	1712051	38	72.3	38	81.92	38	72.7
679451	1712056	39	56.9	39	67.89	39	57.6
679610	1712069	40	78.6	40	85.16	40	78.3
679727	1712056	41	72.0	41	72.01	41	71.7
679885	1712731	42	82.8	42	79.33	42	82.5
679039	1712184	43	67.3	43	68.25	43	61.7
679175	1712194	44	65.5	44	79.75	44	65.9
679329	1712199	45	62.3	45	57.70	45	63.0
679438	1712187	46	76.6	46	67.50	46	77.3
679604	1712191	47	84.5	47	87.22	47	85.2
679731	1712204	48	72.6	48	78.59	48	72.3
679067	1712371	49	69.1	49	73.51	49	69.5
679178	1712362	50	61.3	50	61.15	50	69.8
679434	1712338	51	67.4	51	65.11	51	68.2
679589	1712332	52	61.2	52	71.12	52	61.9
679699	1712342	53	84.4	53	91.83	53	85.1
678897	1712622	54	70.4	54	72.17	54	63.3
679037	1712470	55	61.0	55	67.14	55	61.4
		horario mañana		horario medio día		horario tarde	
Jueves							

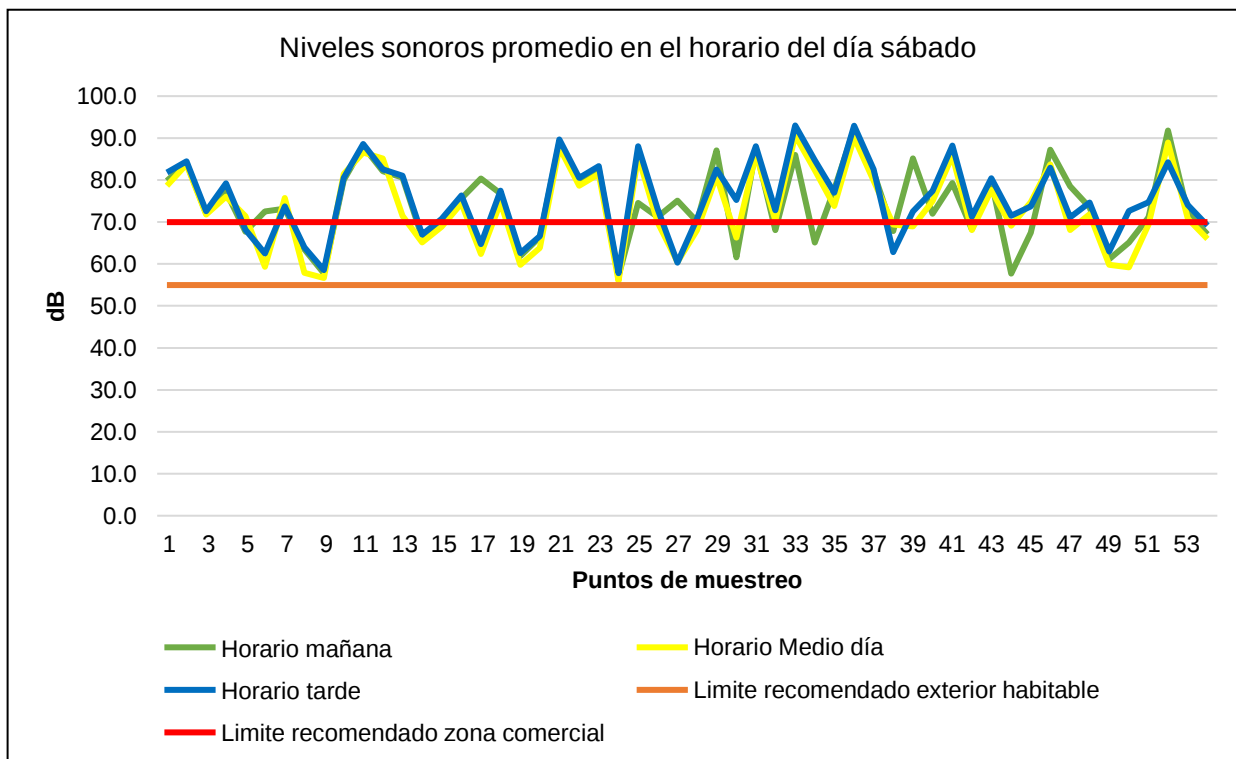
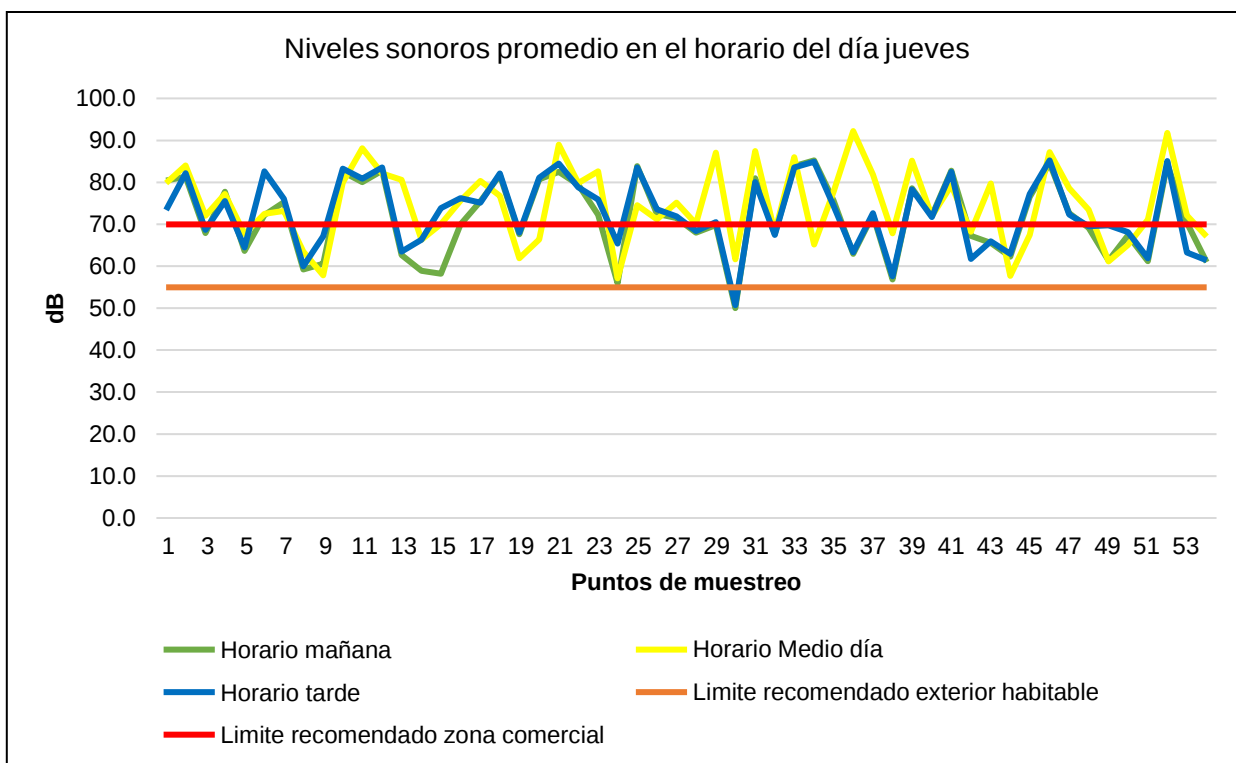
Continuación apéndice 9.

X_GTM	Y_GTM	pto4.1	leq 4.1	pto4.2	leq4.2	pto4.3	leq4.3
678951	1712179	1	79.8	1	78.6	1	81.8
678538	1711592	2	84.0	2	83.7	2	84.5
678420	1711413	3	72.1	3	71.7	3	72.6
678955	1712337	4	77.2	4	76.0	4	79.2
678467	1711525	5	67.7	5	71.4	5	68.2
678953	1712480	6	72.5	6	59.3	6	60.5
679045	1711508	7	73.2	7	75.8	7	73.7
679152	1711548	8	63.5	8	57.9	8	64.0
679589	1711504	9	57.8	9	56.6	9	58.5
678623	1711642	10	80.0	10	81.4	10	80.5
678753	1711669	11	88.1	11	86.6	11	88.6
678882	1711687	12	82.1	12	85.1	12	82.6
679050	1711644	13	80.6	13	71.5	13	81.1
679273	1711689	15	66.3	15	65.1	15	67.0
679451	1711642	16	70.1	16	68.9	16	70.8
679568	1711636	17	75.7	17	74.5	17	76.4
679834	1712339	18	80.3	18	62.4	18	64.8
678940	1711789	19	76.8	19	74.7	19	77.5
679040	1711764	20	61.9	20	59.8	20	62.6
679169	1711801	21	66.4	21	63.8	21	66.6
679313	1711780	22	89.0	22	87.8	22	89.7
679446	1711791	23	79.8	23	78.6	23	80.5
679531	1711741	24	82.6	24	81.4	24	83.3
679712	1711784	25	57.1	25	55.9	25	57.8
679883	1712462	26	74.6	26	85.7	26	88.1
678906	1711918	27	71.2	27	69.9	27	73.1
679047	1711905	28	75.2	28	600.5	28	603.3
679129	1711948	29	70.1	29	68.0	29	70.8
679339	1711918	30	87.1	30	80.9	30	82.5
679423	1711909	31	61.7	31	66.3	31	75.3
679589	1711918	32	87.4	32	86.2	32	88.1
679722	1711919	33	68.1	33	70.4	33	72.8
679846	1712614	34	86.0	34	90.6	34	93.0
679951	1712641	35	65.2	35	82.4	35	84.8
678946	1712050	36	77.8	36	73.8	36	77.0
679146	1712039	37	92.2	37	90.1	37	92.9
679292	1712051	38	81.9	38	79.8	38	82.6
679451	1712056	39	67.9	39	69.4	39	62.8
679610	1712069	40	85.2	40	68.9	40	72.5
679727	1712056	41	72.0	41	74.9	41	77.4
679885	1712731	42	79.3	42	85.8	42	88.2
679039	1712184	43	68.2	43	68.1	43	71.3
679175	1712194	44	79.7	44	77.6	44	80.4
679329	1712199	45	57.7	45	69.1	45	71.5
679438	1712187	46	67.5	46	74.8	46	73.7
679604	1712191	47	87.2	47	83.7	47	82.9
679731	1712204	48	78.6	48	68.1	48	71.1
679067	1712371	49	73.5	49	71.9	49	74.7
679178	1712362	50	61.1	50	59.8	50	63.0
679434	1712338	51	65.1	51	59.2	51	72.6
679589	1712332	52	71.1	52	69.4	52	74.7
679699	1712342	53	91.8	53	88.9	53	84.3
678897	1712622	54	72.2	54	70.8	54	74.0
679037	1712470	55	67.1	55	65.9	55	69.1
		horario mañana		horario medio dia		horario tarde	
Sabado							

Apéndice 10. Niveles sonoros por día de monitoreo



Continuación apéndice 10.



Apéndice 11. Tablas de comparación de los estadísticos de error de los niveles sonoros registrados en el casco urbano de Morales, Izabal, durante las 6 semanas de estudio

Resultados del promedio de los niveles sonoros del día lunes en tres horarios distintos				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día lunes en horario de la mañana				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día lunes en horario medio día				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día lunes en horario de tarde			
Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW
RMSE	7.233	7.705	7.487	RMSE	8.521	8.676	8.628	RMSE	7.930	7.881	8.172	RMSE	8.051	8.896	8.394
MAE	6.162	6.559	6.419	MAE	7.110	7.099	7.209	MAE	6.714	6.748	6.924	MAE	6.938	7.504	7.214
NMAE	9.15%	9.79%	9.59%	NMAE	10.15%	10.12%	10.31%	NMAE	9.70%	9.62%	10.06%	NMAE	9.59%	10.46%	10.01%
BIAS	0.064	-0.014	0.151	BIAS	-0.009	-0.045	0.070	BIAS	0.036	-0.268	0.313	BIAS	-0.083	0.071	-0.081
Coeficiente C.	0.263	0.146	0.149	Coeficiente C.	0.233	0.244	0.205	Coeficiente C.	0.233	0.192	0.120	Coeficiente C.	0.307	0.116	0.192
Resultados del promedio de los niveles sonoros del día miércoles en tres horarios distintos				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día miércoles en horario de la mañana				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día miércoles en horario medio día				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día miércoles en horario de tarde			
Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW
RMSE	7.933	8.297	8.297	RMSE	9.122	9.331	9.278	RMSE	8.234	7.882	8.872	RMSE	7.933	7.658	8.327
MAE	6.678	7.056	7.056	MAE	7.964	7.926	8.046	MAE	6.776	6.848	7.373	MAE	6.895	6.913	7.175
NMAE	10.36%	11.01%	11.01%	NMAE	11.56%	11.62%	11.75%	NMAE	9.94%	10.06%	10.89%	NMAE	9.85%	9.86%	10.30%
BIAS	0.170	0.480	0.480	BIAS	0.089	0.222	0.326	BIAS	0.321	0.183	0.556	BIAS	0.167	0.335	0.513
Coeficiente C.	0.374	0.262	0.262	Coeficiente C.	0.284	0.270	0.241	Coeficiente C.	0.376	0.515	0.176	Coeficiente C.	0.385	0.511	0.277
Resultados del promedio de los niveles sonoros del día jueves en tres horarios distintos				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día jueves en horario de la mañana				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día jueves en horario medio día				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día jueves en horario de tarde			
Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW
RMSE	7.867	8.196	8.108	RMSE	8.436	8.480	8.503	RMSE	9.241	9.391	9.556	RMSE	8.026	8.292	8.192
MAE	6.682	6.846	6.803	MAE	7.166	6.999	7.106	MAE	7.928	7.947	8.084	MAE	6.680	6.782	6.757
NMAE	9.96%	10.27%	10.20%	NMAE	10.40%	10.24%	10.36%	NMAE	10.89%	10.92%	11.17%	NMAE	9.47%	9.71%	9.63%
BIAS	-0.076	0.124	0.196	BIAS	-0.101	0.027	-0.109	BIAS	0.185	0.255	0.505	BIAS	-0.321	0.052	-0.204
Coeficiente C.	0.217	0.160	0.107	Coeficiente C.	0.344	0.359	0.327	Coeficiente C.	0.100	0.072	-0.165	Coeficiente C.	0.275	0.247	0.224
Resultados del promedio de los niveles sonoros del día jueves en tres horarios distintos				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día jueves en horario de la mañana				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día jueves en horario medio día				Resultados del promedio de los niveles sonoros del día jueves en horario de tarde			
Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW	Estadísticos	Kriging	RBF	IDW
RMSE	7.867	8.196	8.108	RMSE	9.241	9.391	9.556	RMSE	9.077	9.082	9.291	RMSE	8.687	8.686	8.930
MAE	6.682	6.846	6.803	MAE	7.928	7.947	8.084	MAE	7.742	7.723	7.917	MAE	7.212	7.183	7.361
NMAE	9.96%	10.27%	10.20%	NMAE	10.89%	10.92%	11.17%	NMAE	10.87%	10.84%	11.15%	NMAE	9.88%	9.84%	10.13%
BIAS	-0.076	0.124	0.196	BIAS	0.185	0.255	0.505	BIAS	0.166	0.120	0.279	BIAS	0.146	0.146	0.314
Coeficiente C.	0.217	0.160	0.107	Coeficiente C.	0.100	0.072	-0.165	Coeficiente C.	0.281	0.296	0.207	Coeficiente C.	0.267	0.293	0.189

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Apéndice 12. Fotografías de los puntos de control para el registro de datos sonoros



Fuente: Elaboración propia, 2020.